

"EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS DE
AGUA SUBTERRANEA"

DIRECTORIO DE CONFERENCIANTES

ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
Jefe del Departamento de Prospección,
Fotogeología y Dibujo.
S.A.R.H.
Dt. Atl # 61 1er. Piso
Tel: 535-85-23

ING. RAYMOND VIGNAUD COMBAS
Gte. General
Investigación Técnica del Subsuelo S. A.
Margaritas 143 Casa 2
Col. Florida
Tel: 534-26-19

ING. C. AUGUSTO LARA VAZQUEZ
Long-Year de México
Guillermo Barrozo # 18 S
Fracc. Industrial Las Armas
Apo. Postal 325
Tlalnepantla Edo. de México
Tel: 572-01-22 572-34-49

ING. ARMANDO GABRIEL CANALES ELORDY
Subjefe de la Oficina de Ingeniería Sanitaria
CIEPS S. C.
Cordova # 127
México 7, D. F.
Tel: 584-16-99 Ext. 133

ING. ARTURO DIFURT CANDELARIA
Jefe de Proyecto de la Dirección
de Agua y Suelo
CPNH S.A.R.H.
Amealco 8 2ºPiso
Tel: 574-85-07

ING. JOSE LUIS QUIJANO LEON
Jefe del Departamento de Aplicaciones
Isotópicas de la Subdirección de
Investigación y Tecnología de Apoyo
S.A.R.H.
Teotihuacan # 19
Tel: 574-56-09

DIRECTORIO DE CONFERENCIANTES

(2)

ING. SALVADOR DIAZ MALDONADO
Jefe de Proyectos de la
Dirección de Inventarios de Agua y Suelo
CPNH S.A.R.H.
Amealco 8 2º Piso
Tel: 574-85-07

ING. CARLOS BUERBA FRANCO
Jefe de Proyecto de la
Dirección de Inventarios de Agua y Suelo
CPNH S.A.R.H.
Amealco 8 2º Piso
Tel: 574-85-07

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

"EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA"
(GEOHIDROLOGIA)

Del 28 de julio al 8 de agosto de 1980

T E M A R I O

M A T E R I A	PROFESOR	FECHA	HORARIO
1. Hidrología y prospección del agua subterránea	Ing. J. M. Lesser	28 de julio	de 17:00 a 21:00 hrs.
2. Introducción a los métodos geofísicos	Ing. R. Vignaud	29 de julio	de 17:00 a 19:00 hrs.
3. Técnicas de perforación	Ing. C. A. Lara	22 de julio	de 19:00 a 21:00 hrs.
4. Propiedades químicas de los recursos hidráulicos y criterios de calidad.	Ing. J. M. Lesser	30 de julio	de 17:00 a 21:00 hrs.
5. Hidrología Subterránea	Ing. A. Canales	31 de julio 1° de agosto	de 17:00 a 21:00 hrs. de 17:00 a 21:00 hrs.
6. Métodos Hidro-Meteorológicos de investigación	Ing. A. Difurt	4 de agosto	de 17:00 a 19:00 hrs.
7. Principios de hidrología superficial	Ing. A. Difurt	4 de agosto	de 19:00 a 21:00 hrs.
8. Técnicas de medición e instrumentación	Ing. A. Difurt	5 de agosto	de 17:00 a 19:00 hrs.
9. Técnicas isotópicas en hidrología	Ing. J. M. Lesser Ing. J. L. Quijano	6 de agosto 6 de agosto	de 17:00 a 18:30 hrs. de 18:30 a 21:00 hrs.
10. Modelos de acuíferos	Ing. S. Díaz	7 de agosto	de 17:00 a 21:00 hrs.
11. Consideraciones principales para la planeación de abastecimiento de agua	Ing. C. Buerba	8 de agosto	de 17:00 a 21:00 hrs.





centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS

DE AGUA SUBTERRANEA

PROSPECCION GEOLOGICA

Ing. Juan Manuel Lesser Illades

julio, 1980



I. - EL CICLO HIDROLOGICO.

El agua subterránea explotable es un recurso renovable que proviene de la lluvia.

Como es sabido, el agua de lluvia que se precipita sobre los continentes, tiene tres caminos por seguir: 1) evaporarse para formar las nubes 2) escurrir por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar; 3) infiltrarse en el subsuelo para formar acuíferos; (Fig. 1)

En esta etapa del Ciclo es donde nos interesa encontrar el agua.

II. - DEFINICIONES. -

Porosidad. - Poro significa intersticio, hueco. La porosidad de una roca es la relación del volumen de sus huecos con su volumen total (Fig. 2)

Permeabilidad. - La palabra permeable significa penetrable, un cuerpo es permeable si se deja atravesar por los fluidos o las radiaciones.

Para el caso que nos ocupa, la permeabilidad de las rocas es la propiedad de dejarse atravesar por el agua.

La permeabilidad de las rocas puede ser primaria cuando se forma al mismo tiempo que la roca, como los huecos que quedan en un depósito de grava al irse acumulando, o secundaria como en una roca compacta que por algún movimiento de la corteza terrestre se fractura y la adquiere.

III. - LAS ROCAS Y SU PERMEABILIDAD. -

Al iniciarse el estudio de un lugar determinado lo primero que se debe conocer es su litología, ya que cada tipo de roca tiene una permeabilidad característica: esta propiedad limita las áreas de interés, pues la búsqueda

da se enfoca a las zonas donde se encuentren rocas consideradas favorables.

Para dar una idea aproximada de esta selección desde el punto de vista litológico, se presenta la siguiente tabla en la que se muestran algunos de los tipos de rocas más comunes en nuestro País. (Tabla D).

En la tabla aparecen tipos de rocas con características diferentes, sin embargo, son solo cuatro de estas, las que ofrecen posibilidades de permeabilidad para constituir acuíferos importantes: gravas, arenas, basaltos y calizas.

Gravas y Arenas.- Las gravas y arenas son sedimentos no consolidados constituidos por fragmentos de rocas arredondados por efecto del arrastre de los ríos que las transportan en grandes cantidades, depositándolas en su propio cauce o en cuencas lacustres y marinas.

La permeabilidad de estos depósitos es mayor cuando tengan mayor uniformidad en el tamaño de los fragmentos. Si hay una gran diversidad de tamaños, los más pequeños rellenan los espacios entre los grandes disminuyendo en forma notable su permeabilidad. (Fig. 3)

Por su origen y medios de depósitos, las gravas están íntimamente relacionadas con las arenas y las arcillas, por lo que es común encontrarlas intercaladas en capas o mezcladas.

Los mayores afloramientos de gravas y arenas en el Altiplano Mexicano y en el Noroeste del País, son sedimentos de edad terciaria (Las Cuencas Lacustres Terciarias del Altiplano Mexicano, Jorge A. Trujillo C. 1975), y en ellos se localizan los principales acuíferos en explotación en el País. (Fig. 4)

Las principales diferencias entre sedimentos terciarios y aluviones recientes son:

1º Es común encontrar a los sedimentos terciarios intercalados o cubiertos por materiales volcánicos; riolíticos, andesíticos y basálticos.

2º Los sedimentos terciarios por lo común están afectados por tectonismo en mayor o menor grado.

3º Por medio de análisis micropaleontológico, ha sido posible datar la edad de los sedimentos terciarios gracias a que es frecuente que es-

tos contengan diatomáceas fósiles.

4º El espesor de los sedimentos terciarios es en general, mayor que el de los aluviones recientes pues el País debido a su geomorfología, se encuentra actualmente en una etapa de erosión activa.

Algunas recomendaciones para dar localizaciones sobre gravas y arenas son:

1º Deben buscarse lugares donde las gravas y arenas estén bien seleccionadas por tamaños, procurando evitar las zonas donde el contenido de arcilla sea grande.

2º Deben evitarse dar localizaciones en parteaguas o en mesetas cortadas por barrancas profundas.

3º Si se pretende perforar sobre riolitas o andesitas con el fin de atravesarlas para encontrar subyacentes gravas y arenas terciarias debe primero determinarse aunque sea en forma aproximada el espesor de cubierta, ya sea por métodos geológicos o geofísicos, pues podría resultar demasiado potente y ser incosteable su perforación.

Basalto. - Es una roca ígnea, volcánica, básica; se presenta en forma de derrames lávicos, bréchas, aglomerados, conos cineríticos y de te-zontle. Su gran permeabilidad se debe a los espacios huecos entre coladas superpuestas, a la existencia de fracturas originadas por enfriamientos, a las grietas originadas por la resistencia a la deformación plástica de las corrientes de lava solidificada y a las zonas de te-zontle.

La presencia de horizontes de depósitos lacustres y suelos arcillosos poco permeables es frecuente en las potentes series de derrames lávicos originado acuíferos colgados, generalmente de bajo potencial pero de gran importancia, debido a la escasez de otros tipos de acuíferos en esas zonas.

La porosidad y permeabilidad de las rocas volcánicas tiende a disminuir con el tiempo geológico, debido al tectonamiento de los espacios huecos con los materiales arcillosos producto de la descomposición de las propias rocas.

Para dar localización sobre este tipo de rocas donde la permeabilidad es generalmente grande, deben escogerse sitios bajos, respecto a la topografía regional, pues es común que el agua que se infiltra en ellos, se drene rápidamente.

Calizas. - Las calizas son rocas formadas principalmente por carbonato de calcio, originadas por procesos orgánicos y químicos en medios lacustres y marinos, las cuales han emergido a la superficie por medio de movimientos tectónicos.

Estas rocas tal como surgen a la superficie, por lo común presentan baja permeabilidad que puede ser primaria, como la causada por la porosidad entre los fragmentos fósiles en las zonas arrecifales o en los planos de estratificación entre dos capas superpuestas, o secundaria, como la que se presenta por fracturamiento y principalmente por la disolución de la roca por el agua de lluvia.

El agua de lluvia a su paso por la atmósfera se carga de ácido carbónico, el cual ataca fuertemente a las rocas calcáreas, disolviéndolas. Al caer sobre ellas, si encuentra alguna zona fracturada, así sea poco permeable inicia su infiltración y ataque, ensanchando las grietas, y produciendo conductos y cavernas, lo cual incrementa grandemente su permeabilidad.

Debido a la plasticidad de este tipo de rocas, es común que al verse afectados por movimientos tectónicos no se fallen y fracturen tan fácilmente sino que primero se plieguen, formando anticlinales y sinclinales.

Para dar localizaciones sobre este tipo de rocas, se deben localizar:

a). - Zonas donde las calizas estén lo más pura que sea posible, o sea que su contenido de arcilla sea mínimo, pues mientras más contenga será menos soluble.

b). - Las zonas donde se observan gran cantidad de cavernas y conductos de disolución son favorables.

c). - Las zonas arrecifales, frecuentemente ofrecen buena permeabilidad.

d). - Que no hayan capas de lutitas intercaladas en gran proporción.

e). - El fracturamiento, por lo general es mayor en los lomos de los anticlinales y en los fondos de los sinclinales resultando sitios buenos para la perforación de pozos, sin embargo, los lomos anticlinales hay ocasiones en que son de difícil acceso, y los sinclinales es frecuente que estén cubiertos por gruesos depósitos de formaciones impermeables, por lo que muchas de las perforaciones se dan en los flancos de estas estructuras.

f). - Siendo la permeabilidad, entre estratos, la más importante, es conveniente dar localizaciones de tal manera que corten el mayor número de estratos posible, siendo más favorables las zonas que han sido afectadas por tectonismo. Por lo que es recomendable situarlas en formaciones medianamente plegadas.

g). - Existen formaciones calcáreas que en un determinado lugar se presentan permeables y producen eficientemente y en distancia más o menos cortas se encuentran impermeables e improductivas. Uno de los principales motivos de este comportamiento son los cambios laterales en su composición como por ejemplo, un aumento de su contenido en arcilla, lo que provoca una disminución en su solubilidad.

Otras Rocas. - Los demás tipos de rocas no deben desecharse totalmente, pues hay varios lugares donde algunas de ellas están produciendo en forma eficaz.

Sin embargo, deben considerarse con posibilidades, mucho menores pues su permeabilidad dependerá de zonas de fracturamiento, las cuales no siempre son fáciles de detectar a profundidad.

Hay ocasiones en que no se tiene otra alternativa y es necesario dar localizaciones para perforación sobre este tipo de rocas, en cuyo caso deben buscarse zonas afectadas por fallas y fracturas, tratando de cortarlas en forma y a la profundidad más conveniente. De ser posible se recomienda efectuar exploraciones directas con pozos de pequeño diámetro, con equipo de muestreo de núcleos.

IV. - MÉTODOS DE EXPLORACION. -

Los métodos de exploración se dividen en directos e indirectos. Los métodos directos más comunes consisten en observaciones de campo y perforaciones; los indirectos en métodos geofísicos.

Métodos Directos. - En la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, los métodos directos de exploración más utilizados son:

Observaciones de campo. - En éstas se aplican lo que se ha tratado de exponer en los párrafos anteriores. Para lo cual nos auxiliamos con planos geológicos, topográficos, climatológicos, fotografías aéreas y equipo de campo, esencialmente brújula, altímetro y martillo.

Perforaciones Exploratorias. - Consisten en perforaciones en diámetro de 3 a 4 1/2", con brocas de diamante o de roles, con o sin muestreo de núcleos. En estas perforaciones se obtienen los siguientes datos:

a). - Columna litológica.

b). - Nivel estático.

c). - Calidad del agua.

d). - Una idea sobre las posibilidades de producción de acuerdo con las pérdidas de fluidos de perforación, sifonco, extracciones con émbolo, inyección de agua, etc.

Además se puede obtener el registro eléctrico del pozo.

Métodos indirectos. - La característica principal de estos métodos es que las mediciones de ciertos parámetros físicos (resistividad, elasticidad, etc.) se realizan desde la superficie del terreno, y en base a éstos es posible inferir ciertas condiciones del subsuelo. Dentro de esta clasificación se encuentran los métodos geofísicos, de los cuales, los mayormente utilizados en la prospección para el agua subterránea son:

- a). - Método Eléctrico de resistividad.
- b). - Método Sísmico de refracción.

Los cuales nos ayudarán entre otros, a definir la geometría del sistema acuífero y auxiliarnos en diversos problemas de tipo estructural.

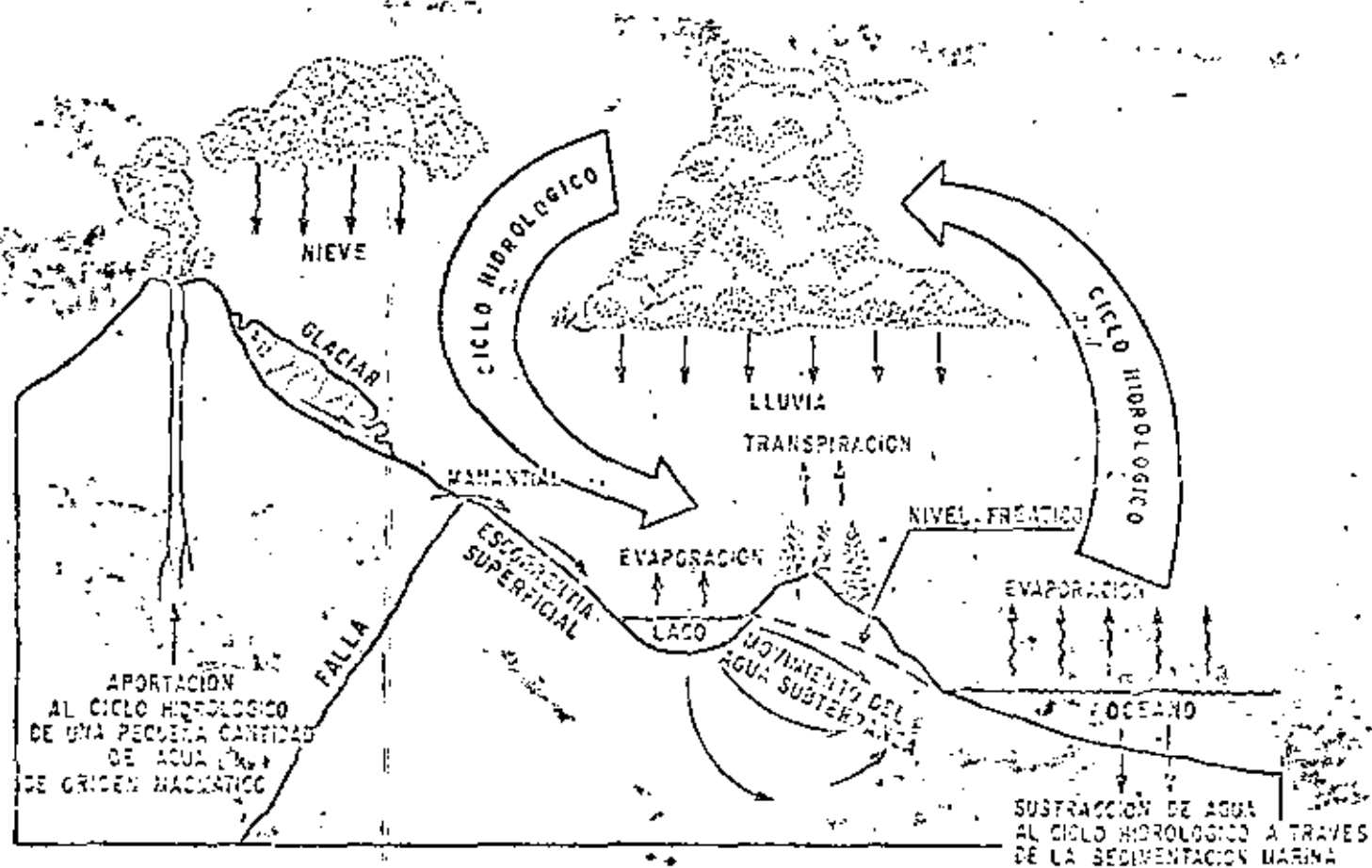


FIG. - 1

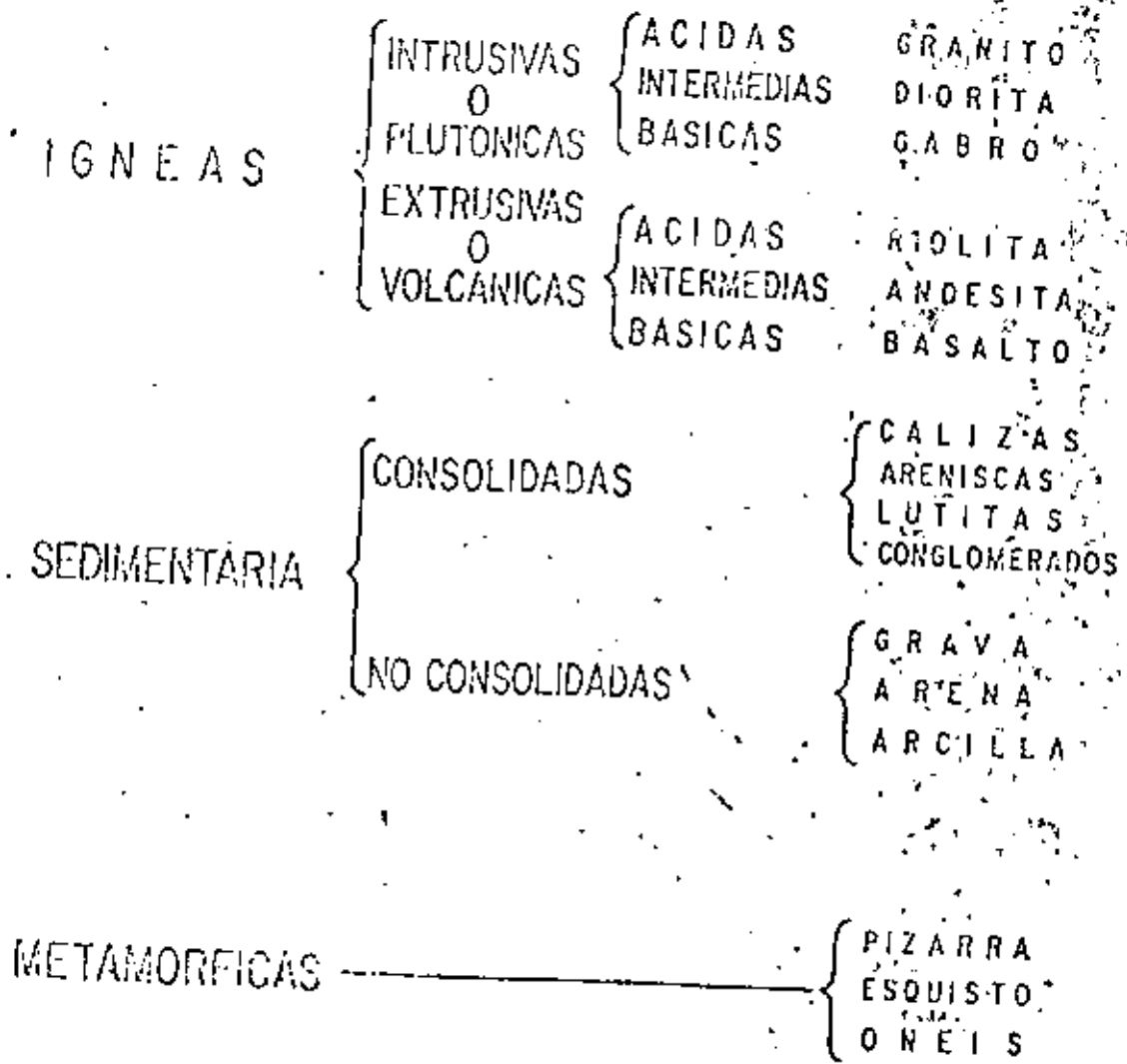
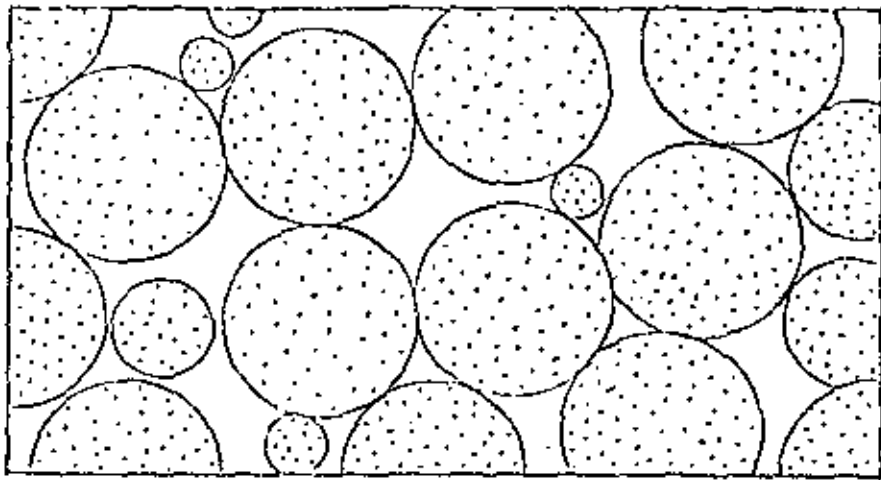
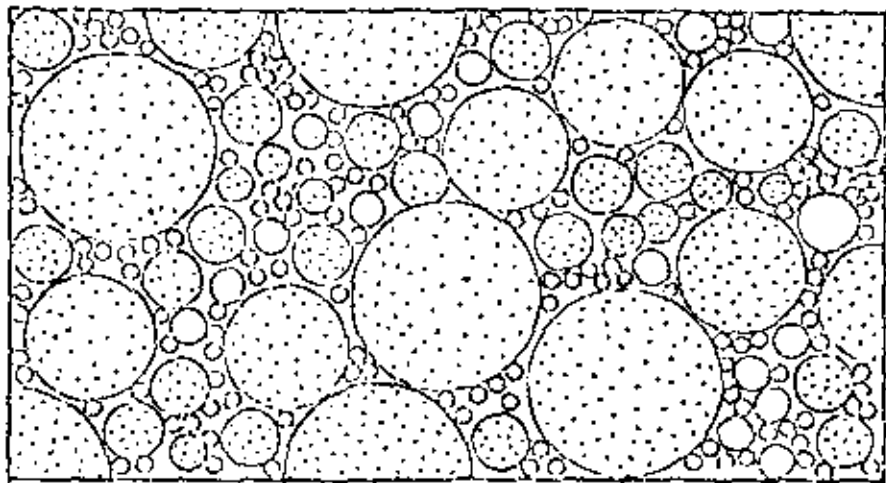


TABLA I



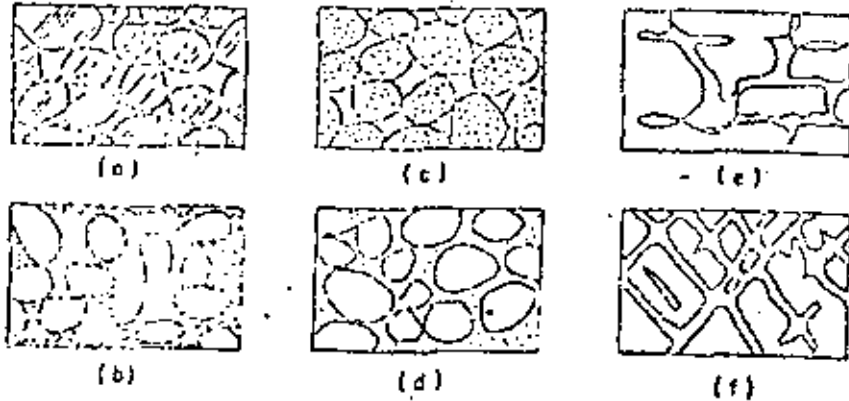
POROSIDAD 32%



POROSIDAD 17%

—Variación de la porosidad debida al grado de homogeneidad del tamaño de los granos. Los números que figuran al pie de cada dibujo indican el porcentaje de porosidad de la muestra.

FIG. - 2



Distintos tipos de intersticios y relación entre la textura y la porosidad de las rocas. a) Depósito sedimentario de elementos de tamaño uniforme; porosidad alta. b) Depósito sedimentario constituido por elementos heterométricos; baja porosidad. c) Depósito homométrico de cantos rodados - porosos; porosidad muy alta. d) Depósito sedimentario cuya porosidad ha disminuido por colmatación de los intersticios con materiales finos. -- e) Rocas cuya porosidad se debe a fenómenos de disolución. f) Rocas porosas por fracturación.

FIG. - 3



centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS

DE AGUA SUBTERRANEA

HIDROGEOQUIMICA

Ing. Juan Manuel Lesser Illades

julio, 1980

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities. It emphasizes that this is crucial for ensuring transparency and accountability in the organization's operations.

2. The second part of the document outlines the various methods and tools used to collect and analyze data. It highlights the need for consistent and reliable data collection processes to support effective decision-making.

3. The third part of the document focuses on the role of technology in data management and analysis. It discusses how modern software solutions can streamline data collection, storage, and reporting, thereby improving efficiency and accuracy.

4. The fourth part of the document addresses the challenges associated with data management, such as data quality, security, and privacy. It provides strategies to mitigate these risks and ensure that data is used responsibly and ethically.

5. The fifth part of the document concludes by summarizing the key findings and recommendations. It stresses the importance of ongoing monitoring and evaluation to ensure that data management practices remain effective and aligned with the organization's goals.

6. The sixth part of the document provides a detailed overview of the data collection process, including the identification of data sources, the design of data collection instruments, and the implementation of data collection procedures.

7. The seventh part of the document discusses the importance of data quality and the steps taken to ensure that the data collected is accurate, complete, and reliable. It also addresses the issue of data consistency across different sources and time periods.

8. The eighth part of the document focuses on the analysis and interpretation of the collected data. It describes the various statistical and analytical techniques used to extract meaningful insights from the data and to identify trends and patterns.

9. The ninth part of the document discusses the role of data in decision-making and the importance of using data-driven insights to inform strategic and operational decisions. It also highlights the need for clear communication of data findings to relevant stakeholders.

10. The tenth part of the document provides a final summary and concludes the report. It reiterates the key findings and recommendations and expresses confidence in the effectiveness of the data management and analysis processes described in the document.

C O N T E N I D O

I.- RESUMEN

II.- GENERALIDADES

- _ El ciclo hidrológico
- _ Balance del agua dentro del ciclo hidrológico.
- _ Química del agua del ciclo hidrológico.
 - a) Composición del agua de lluvia
 - b) Composición del agua de ríos
 - c) Composición del agua de mar
 - d) Composición del agua subterránea

III.- METODO DE TRABAJO EN LA INTERPRETACION HIDROGEOQUIMICA.

- _ Selección y muestreo del agua subterránea
- _ Análisis físico-químicos
- _ Unidades usadas para reportar los análisis químicos.
- _ Elaboración de tablas, planos y diagramas e interpretación de los mismos.
 - a) Tablas resumen
 - b) Configuraciones
 - c) Diagramas triangulares
 - d) Resistividades y sólidos totales disueltos.

IV.- GRADO DE SATURACION DEL AGUA CON RESPECTO A LOS MINERALES MAS COMUNES.

- _ Metodología.

V.- GENERALIDADES SOBRE LA INTRUSION SALINA EN ACUIFEROS COSTEROS Y METODOS DE CONTROL.

- _ Características físicas de la intrusión salina.
- _ Principio de Gyben-Herzberg.
- _ Mecanismo de la intrusión salina.
- _ Métodos de control de la intrusión salina.
 - a) Reducción de la extracción.
 - b) Recarga artificial
 - c) Fronteras impermeables
 - d) Barrera de pozos de bombeo
 - e) Barrera con pozos de inyección
 - f) Método combinado

VI.- CALIDAD DEL AGUA Y SIGNIFICADO DE ALGUNAS DE SUS PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS.

- _ Agua potable
- _ Agua para riego

- Agua para abrevadero
- Agua para la industria
- Significado de algunas propiedades físicas y químicas del agua.

- a) Bicarbonato y carbonato
- b) Boro
- c) Calcio
- d) Color
- e) Cloruro
- f) Concentración de hidrógeno
- g) Conductividad eléctrica.
- h) Dureza
- i) Estroncio
- j) Hierro
- k) Fluor
- l) Fosfato
- m) Litio
- n) Magnesio
- o) Manganeso
- p) Nitrógeno
- q) Potasio
- r) Relación de adsorción de sodio
- s) Selenio
- t) Silice
- u) Sodio
- v) Sólidos disueltos
- w) Sulfatos

VII.- TRAZADORES

- Resumen
- Introducción
- Fluoriceinas

- a) Uranina
- b) Eosina
- c) Aminorhodamina G extra
- d) Rodamina FB
- e) Tinopal CBS-X
- f) Ejemplo sobre la aplicación de fluoriceina.

- Sales

- a) Ejemplo sobre la aplicación de sales

- Esporas

- Isotopos

- a) Deuterio y oxígeno 18
- b) Tritio
- c) Carbono 14

- conclusiones y Recomendaciones.

H I D R O G E O Q U I M I C A

Por: Ing. Juan Manuel Lasser I.

I. RESUMEN

La interpretación geoquímica del agua subterránea, se utiliza junto con la geología, hidrología y geofísica, como un auxiliar para conocer y entender, en una forma más completa, el funcionamiento de los acuíferos y la planeación de una mejor y más racional explotación.

Para efectuar la interpretación geoquímica, se toma en cuenta que, el agua que forma los acuíferos, proviene principalmente de la lluvia, donde parte de ésta, al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se infiltra y corre a través de ellas. Al circular por el subsuelo, entra en contacto con diversas rocas, disolviendo las sales minerales que las forman y produciendo cambios en su composición. La química del agua dependerá de la solubilidad y composición de las rocas por las que circula y de los factores que afectan la solubilidad, como son: las temperaturas del agua y las rocas, el área de contacto del agua con las formaciones, la velocidad de circulación, la longitud del recorrido, la previa composición química del agua y otros factores.

Por lo tanto, la composición del agua está en íntima relación con el funcionamiento general del acuífero. Es por ello que, a partir de su composición química, se puede obtener la dirección del movimiento del agua subterránea, la localización de las zonas de recarga del acuífero, los tipos de roca a través de las cuales circula, así como algunas características físicas del acuífero y la calidad del agua para usos agrícolas, ganaderos, agropecuarios, potables, turísticos e industriales.

A lo largo de las líneas de costa, en las planicies costeras, el agua de los acuíferos se encuentra en contacto sobre el agua de mar, debido a la diferencia de densidades de éstas. El contacto entre estas dos masas de agua se encuentra en equilibrio y, las modificaciones producidas en las condiciones originales del acuífero, originan cambios en la posición de dicho contacto. Al explotar los acuífe-

ros costeros, se rompe este equilibrio, produciendo una intrusión de agua de mar, dentro del acuífero.

Debido a las diferencias en concentración y composición química, existente entre el agua de mar y el agua dulce, los métodos geoquímicos ayudan a conocer la posición y velocidad de avance de la intrusión salina.

En diferentes laboratorios de la S. R. H., la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, ha venido efectuando análisis químicos de muestras de agua, obtenidas tanto en pozos como en norias, galerías filtrantes y manantiales. En estos laboratorios se determinan los sólidos totales disueltos, la conductividad eléctrica, la dureza total y las concentraciones de los iones siguientes: Ca, Mg, Fe, Mn, Na, SO_4 , Cl, HCO_3 , NO_2 y NO_3 , principalmente.

Con los resultados de los análisis, se elaboran configuraciones de los índices más representativos, obteniéndose, a partir de ellas, las zonas de recarga, las cuales coinciden con los lugares donde se encuentran las menores concentraciones de sales. Se obtiene también, la dirección del flujo del agua subterránea, debido a que ésta va disolviendo mayor cantidad de sales conforme avanza. Así, también se pueden determinar las zonas con mayor o menor permeabilidad, ya que éstas afectarán, en mayor o menor grado, la composición y concentración de sales en el agua.

A partir de la composición química del agua, se deduce el tipo de roca que forma el acuífero, así, el agua que circula a través de rocas calizas, tendrá en solución abundante calcio y carbonatos, en contraste con agua que circula a través de rocas yesíferas, la cual tendrá disueltos iones de calcio y sulfatos.

Para obtener la calidad del agua para uso doméstico, se comparan los resultados de los análisis químicos, con los límites máximos permisibles ya establecidos, obteniéndose, rápida y directamente, la clase de agua para este uso.

Con respecto a la clase de agua para riego, se utiliza la clasificación de Wilcox, a partir de la cual y por medio de las concentraciones de sodio, magnesio, calcio y la conductividad eléctrica, se conoce la clase de agua para riego a que pertenece cada muestra analizada, así como las recomen-

daciones relativas al tipo de suelo en que debe usarse, las prácticas del control de la salinidad y los tipos de cultivos más adecuados.

Para la industria, el agua se puede clasificar inicialmente por su dureza. Posteriormente, dependiendo del tipo de industria, el agua deberá cumplir ciertos requisitos establecidos.

II. GENERALIDADES

2.1. EL CICLO HIDROLOGICO

Como es sabido, el agua de lluvia que se precipita sobre los continentes, tiene tres caminos por seguir: 1) evaporarse para formar las nubes; 2) escurrir por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar y; 3) infiltrarse en el subsuelo para formar acuíferos. Esta agua infiltrada, posteriormente es drenada por corrientes superficiales o aflora en forma de manantiales para evaporarse y seguir su camino hacia el mar.

2.2. BALANCE DEL AGUA DENTRO DEL CICLO HIDROLOGICO

Del 100% del agua que se evapora, para incorporarse a la atmósfera en forma de nubes, el 86% proviene del mar y el 14% restante, de los continentes. Del 86% que se evapora en los océanos, el 78% se precipita en el mar y el 8% en los continentes. (Fig. 1). El otro 14% de evaporación, se precipita sobre los continentes, haciendo un total de 22% de precipitación sobre éstos. De este 22%, se evapora el 14%, escurre hacia el mar en forma de corrientes superficiales el 7%, y el 1% restante se infiltra en el subsuelo y en forma de agua subterránea, es incorporada al mar.

El agua subterránea que forma los acuíferos proviene principalmente de la lluvia, donde parte de ésta al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se infiltra y corre a través de ellas. El agua infiltrada, en ocasiones, pasa por zonas cercanas a cámaras magmáticas o puede permanecer atrapada entre sedimentos en forma de agua fósil.

Al circular por el subsuelo, entra en contacto con diversas formaciones geológicas, disolviendo las sales minerales que forman las rocas y produciendo cambios en su composición. Por lo tanto, la composición química del agua dependerá de

C I C L O H I D R O L O G I C O

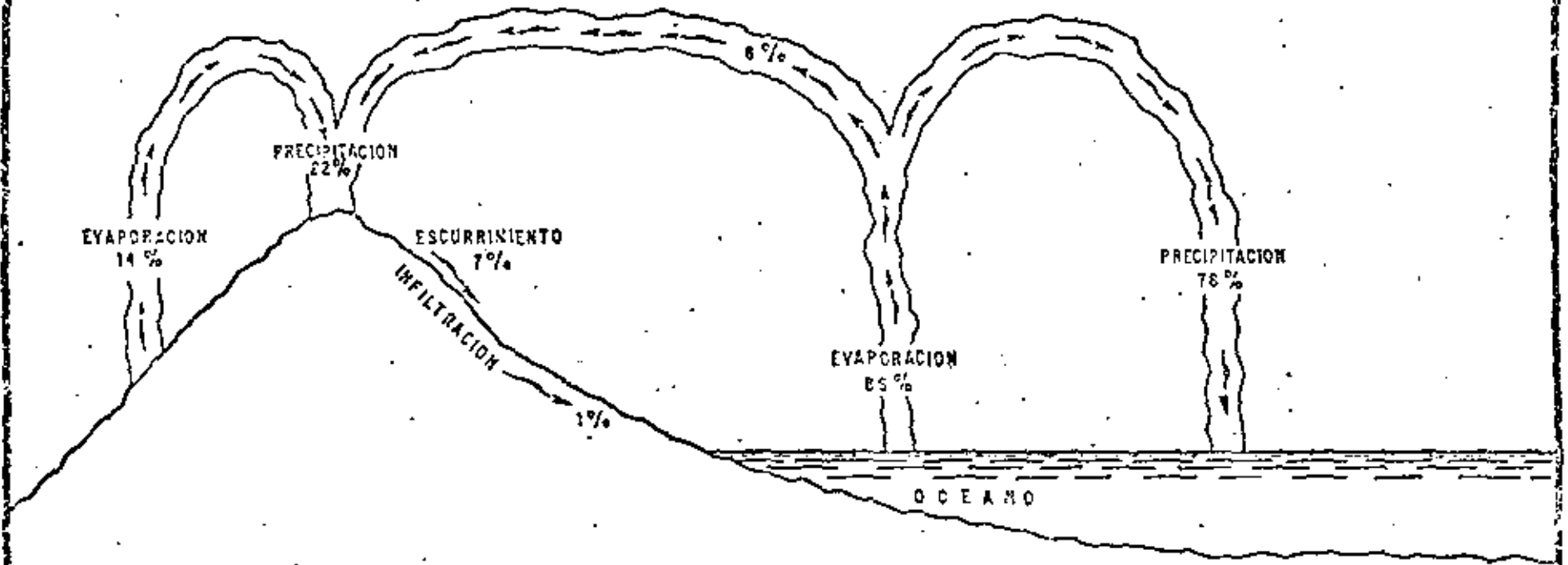


FIG.- 1

la solubilidad y composición de las rocas por las que circula y de los factores que afectan la solubilidad, como son: las temperaturas del agua y las rocas; el área de contacto del agua con las formaciones, la velocidad de circulación, la longitud del recorrido, la previa composición química -- del agua y otros factores.

2.3. QUIMICA DEL AGUA DEL CICLO HIDROLOGICO

- a) Composición del agua de lluvia. - Al precipitarse hacia la corteza terrestre, arrastra diferentes materiales finos, que se encuentran en suspensión en la atmósfera y que, en muchos casos, son transportados por el viento.

La composición química general del agua de lluvia, según Garrels y Mackenzie (1971), es la siguiente: (Figs. 2 y 3)

Na	1.98 ppm	Ca	0.09	HCO ₃	0.12
K	0.30	Cl	3.79		
Mg	0.27	SO ₄	0.58		

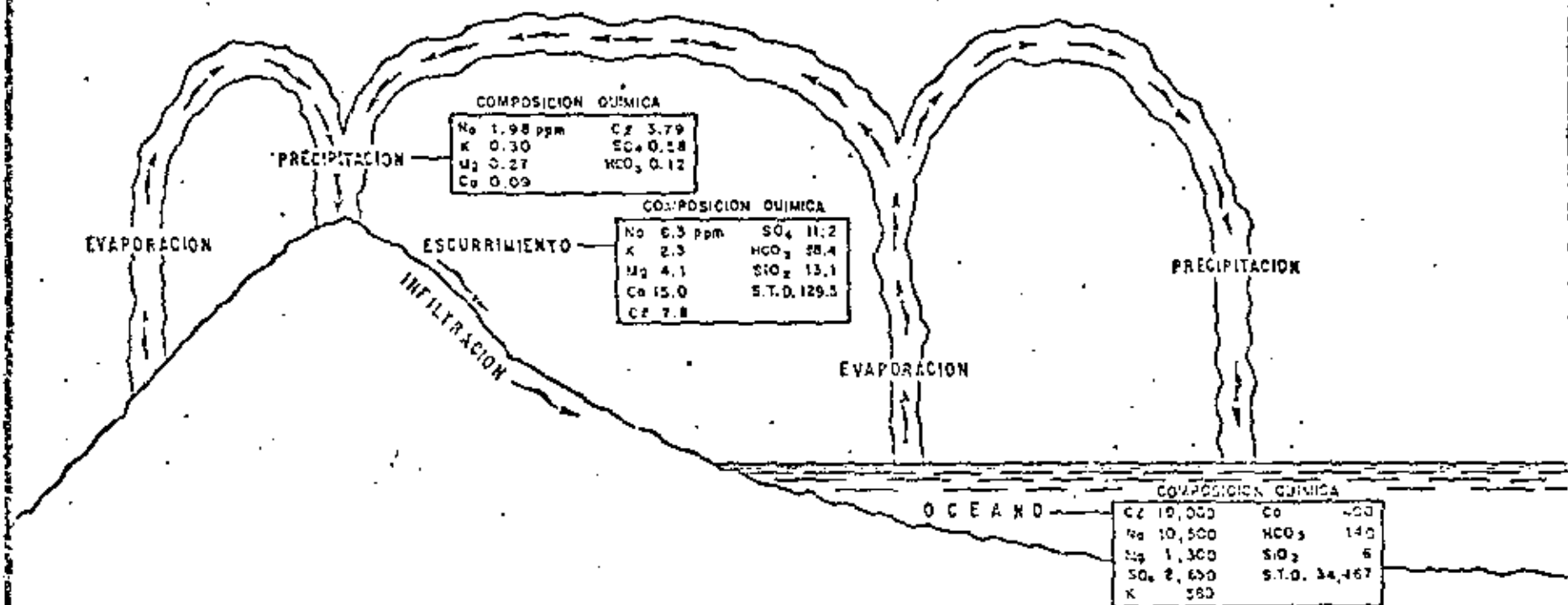
La concentración de elementos disueltos en la lluvia en diferentes lugares, es variable: por ejemplo, el contenido de cloro y sodio, en la precipitación que se lleva a cabo en algunas zonas costeras, es mayor de 2 y 1 ppm respectivamente, mientras que en los continentes es menor de 0.3 y 0.2 ppm, respectivamente.

Debido a la baja concentración de sales en el agua de lluvia, ésta se considera como "agua pura" y las variantes existentes entre la composición y concentración de un lugar a otro, no son de importancia en la interpretación hidrogeoquímica, salvo lugares excepcionales, donde corrientes de aire levantan una gran cantidad de partículas que posteriormente son arrastradas por la lluvia.

Al precipitarse, las moléculas de agua incorporan bióxidos de carbono de la atmósfera, formando ácido carbónico como se ilustra en la siguiente reacción.



CICLO HIDROLOGICO Y COMPOSICION MEDIA DEL AGUA DE LLUVIA, RIOS Y OCEANOS



ILUSTRACION SOBRE LA COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA EN DIVERSAS CIRCUNSTANCIAS

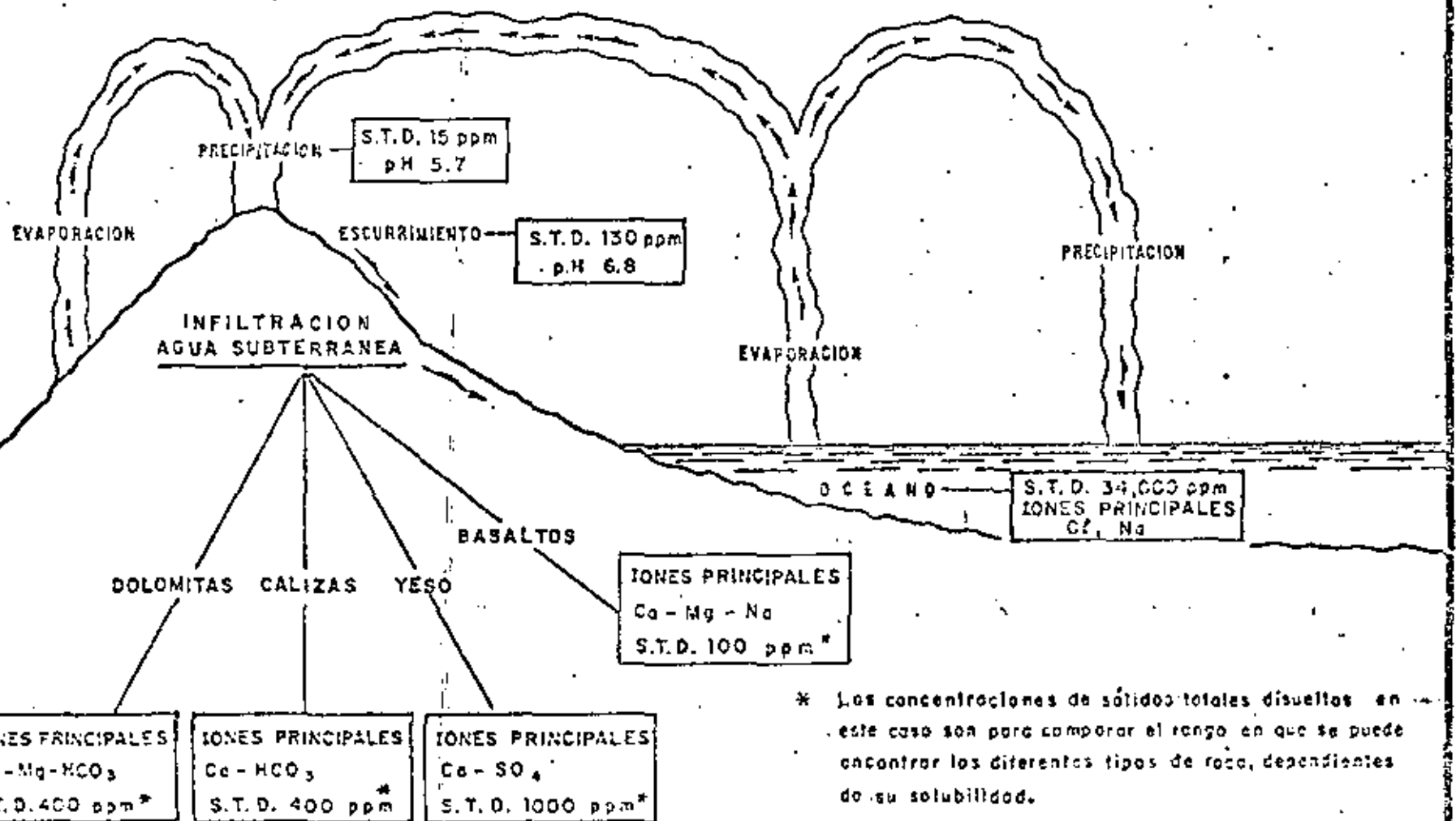


FIG - 3

Este ácido, tiene un gran poder de disolución y es el principal agente de ataque del agua sobre las rocas.

- b) Composición del agua de ríos. - Las corrientes superficiales, que en la mayoría de los casos son la causa inmediata de la lluvia, tienen contacto con los materiales que forman los cauces, así como con los fragmentos de roca transportados por la corriente.

Al contacto con dichos materiales, el agua los ataca y disuelve, llegando a tener una composición dependiente del tipo de materiales con los que tiene contacto.

La composición promedio del agua de ríos, según Livingstone (1963), es la siguiente:

Cl	7.8 ppm	Ca	15.0	Al	0.01
Na	6.3	HCO ₃	58.4	S.T.D.	129.5
Mg	4.1	SiO ₂	13.1		
SO ₄	11.2	NO ₃	1.0		
K	2.3	Fe ⁺⁺	0.67		

- c) Composición del agua de mar. - Los océanos constituyen los mayores depósitos de agua en el mundo, y se caracterizan por tener una gran cantidad de sales disueltas. Estas sales son producto de la erosión química efectuada por el agua durante el ciclo hidrológico, desde la formación de la tierra, hasta nuestra época.

Originalmente, los océanos se formaron por condensación de vapor de agua, la cual se acumuló en las partes bajas de la tierra. Se inició el ciclo hidrológico y esta agua empezó a disolver los minerales que formaban las rocas, conduciendo las sales, producto de erosión química, hacia las cuencas oceánicas. Continuó el ciclo hidrológico y con él, el aumento de sales en el agua de mar.

La composición química del agua de mar, de acuerdo con Goldberg (1957), es:

Cl	19,000 ppm	Ca	400
Na	10,500	HCO ₃	140
Mg	1,300	SiO ₂	6
SO ₄	2,650	S.T.D.	34,467
K	380		

- d) Composición del agua subterránea. - La composición química del agua subterránea dependerá del tipo de roca, a través de la cual circula y de otros muchos factores complejos. (Fig. 3).

Así, tenemos que un agua que circula a través de rocas calizas, tendrá principalmente iones de calcio, carbonatos y bicarbonatos. Si circula por yesos y anhidritas, tendrá una gran cantidad de sólidos disueltos, debido a la fácil disolución de estas rocas, predominando la presencia de iones de calcio y sulfatos. El agua que circula a través de basaltos, tendrá pocos sólidos disueltos, debido a que esta roca es de difícil disolución; además, tendrá aproximadamente, la misma cantidad de calcio, magnesio y sodio.

En las figuras 4 y 5 se muestra la composición química de algunas rocas y minerales comunes.

III. METODO DE TRABAJO EN LA INTERPRETACION HIDROGEOQUIMICA

Para llevar a cabo una interpretación hidrogeoquímica, se procede de la siguiente manera (Fig. 6):

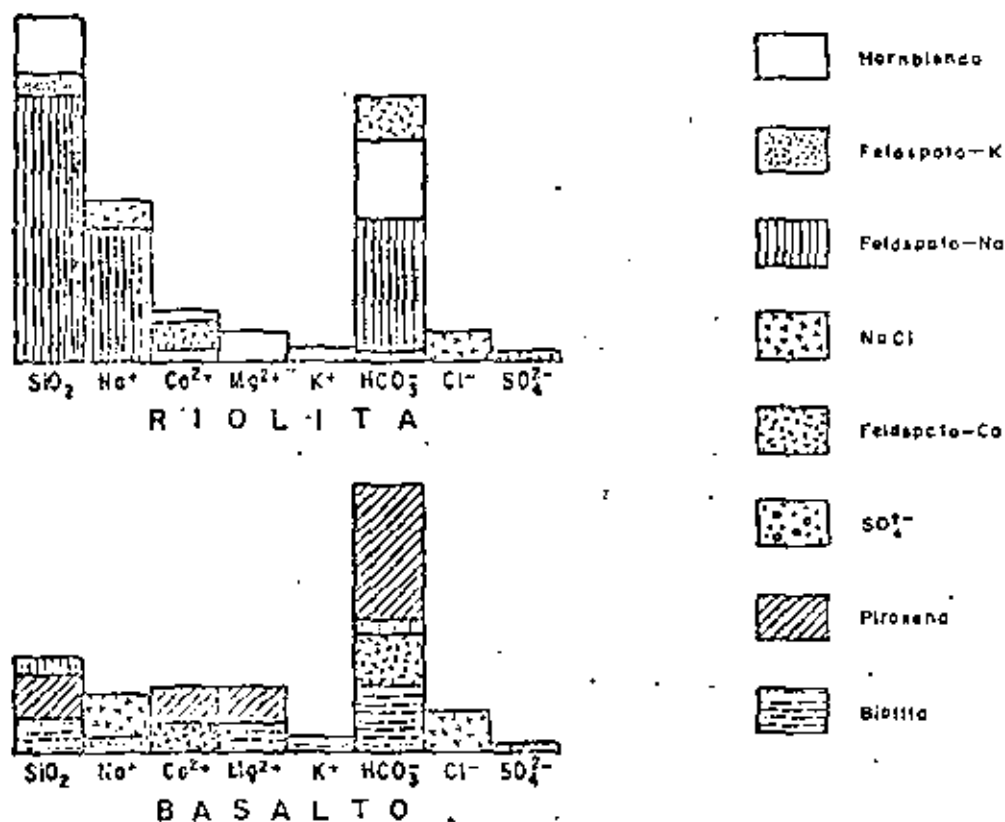
3.1. SELECCION Y MUESTREO DEL AGUA SUBTERRANEA

Se efectúa una selección de aprovechamientos, tomando en cuenta una distribución espacial, que dependerá de las circunstancias, así como el tipo de aprovechamiento ya sea pozo, noria, manantial, galería, etc., ya que en ocasiones, los diferentes tipos de aprovechamientos, corresponden a sistemas acuíferos diferentes.

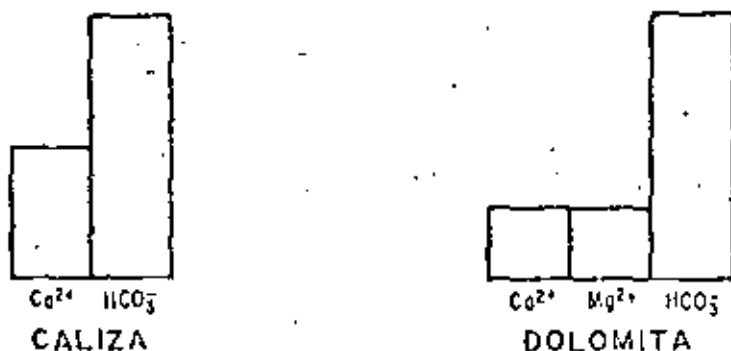
El muestreo se debe efectuar usando frascos de polietileno de un litro de capacidad, con doble tapa. Los frascos deben llenarse totalmente para evitar la gasificación de algunos componentes que podría provocar reacciones químicas y alterar la composición de la muestra que es representativa de enormes volúmenes de agua.

Al obtener la muestra en el campo, se deben tomar datos relativos a la localización y características del aprovechamiento, así como la temperatura ambiente, la temperatura del agua al momento del muestreo, el pH y la resistividad

COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA
QUE CIRCULA POR DIFERENTES ROCAS

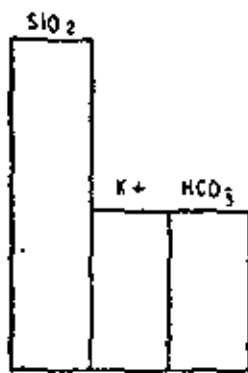


RECONSTRUCCION EN HISTOGRAMAS DE LA COMPOSICION
DEL AGUA DE RIOLITAS Y BASALTOS

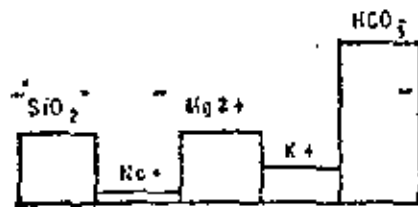


HISTOGRAMAS MOSTRANDO LA COMPOSICION
DEL AGUA DE CALIZAS Y DOLOMITAS

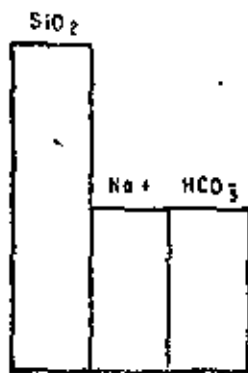
COMPOSICION QUIMICA DE ALGUNOS MINERALES



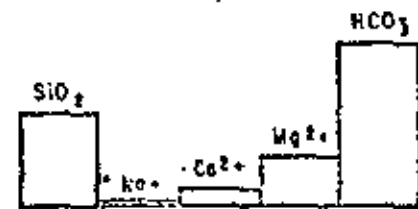
FELDSPATO-K



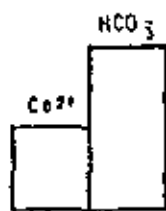
BIOTITA



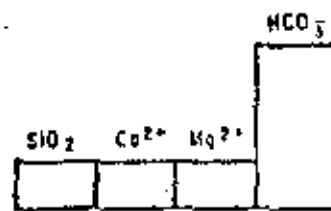
FELDSPATO- Na



HORNBLENDA



FELDSPATO- Ca



PIROXENA

DIAGRAMAS DE BARRAS QUE MUESTRAN LA COMPOSICION DE ALGUNOS MINERALES CONSTITUYENTES DE LAS ROCAS IGNEAS

INTERPRETACION GEOQUIMICA

METODO DE TRABAJO

SELECCION Y MUESTREO DEL AGUA SUBTERRANEA

- SELECCION POR POZOS, NORIAS, GALERIAS FILTRANTES Y MANANTIALES.
- MEDICION DE pH Y TEMPERATURA DEL AGUA EN EL CAMPO.
- OBTENCION DE LA MUESTRA DE AGUA EN BOTE LLA DE POLIETILENO DE UN LITRO DE CAPACIDAD

ANALISIS FISICO - QUIMICOS

DETERMINACION DE CALCIO, MAGNESIO, SODIO, POTASIO, BICARBONATO, CLORURO, SULFATO, SOLIDOS TOTALES DISUELTOS, ETC.

ELABORACION DE PLANOS, Y DIAGRAMAS E INTERPRETACION DE LOS MISMOS

TABLA RESUMEN CONFIGURACIONES DIAGRAMAS TRIANGULARES ETC.

FIG. 6.

eléctrica del agua.

3.2. ANALISIS FISICO-QUIMICOS

Una vez obtenidas las muestras, se remiten al laboratorio - en donde se efectúan los análisis fisicoquímicos, determinándose las concentraciones de los principales cationes (Ca, Mg, Na, K), aniones (HCO_3 , Cl, SO_4) los sólidos totales disueltos y, dependiendo del tipo de terreno, su sugiere la - determinación de otros índices, por ejemplo, para un terreno con trazas de termalismo, sería conveniente la determinación de litio y boro, así para otros casos, se requeriría - determinar FeO, MnO, SiO_2 , F, etc. (Fig. 18)

SOLIDOS TOTALES DISUELTOS.- Los sólidos totales disueltos representan el residuo que queda al evaporar cierta cantidad del agua. No son representativas de la suma de las concentraciones de los diferentes elementos analizados, ya que, durante la evaporación en el laboratorio, los sólidos volátiles se pierden y los bicarbonatos se convierten en carbonatos. También quedan retenidas cierta cantidad de agua de cristalización que no alcanza a evaporarse. Por lo tanto, el valor de los sólidos totales disueltos, sólo proporciona un índice del ataque del agua sobre las formaciones geológicas y de la solubilidad y facilidad de remoción de las sales del subsuelo.

3.3. UNIDADES USADAS PARA REPORTAR LOS ANALISIS QUIMICOS

Las unidades más comunes, en las que se reportan los análisis químicos efectuados a muestras de agua, son: partes -- por millón y miliequivalentes por litro.

Las "partes por millón", son unidades de peso por peso, que equivale a un miligramo de soluto, por un kilogramo de solución. La unidad de peso por volumen, se tiene al asumir -- que un litro de solución, pesa un kilogramo; entonces, tenemos que una "parte por millón", es igual a un "miligramo -- por litro".

Debido a que las unidades anteriores están dadas en peso, - no hay equivalencia entre iones de diferente especie, o sea, que no se pueden mezclar, debido a que tienen diferente peso molecular y carga eléctrica. Por lo tanto, para relacionar diferentes iones en fórmulas químicas o para efectuar - correlaciones entre ellos, se utilizan unidades equivalentes.

La unidad más usada es el "miliequivalente por litro", la cual se obtiene multiplicando los "miligramos por litro", por $\frac{C}{PA}$; donde "C" es la carga del ion y "PA" es el peso atómico.

Otra unidad conocida y usada en Química, es "moles por litro", siendo una mole, el peso atómico de una sustancia en gramos.

Las abreviaciones usadas en las unidades mencionadas, son las siguientes:

ppm	partes por millón.
mg/l	miligramos por litro.
me/l	miliequivalentes por litro.
mol/l	moles por litro.

3.4. ELABORACION DE TABLAS, PLANOS Y DIAGRAMAS E INTERPRETACION DE LOS MISMOS

- a) Tablas resumen. - Para controlar y tener una idea en conjunto de la composición, concentración y calidad del agua, se recomienda elaborar tablas en las cuales se resuma toda la información obtenida. En la Fig. 16 se muestra un ejemplo.
- b) Configuraciones. - Con el objeto de tener una distribución espacial de la calidad del agua y con ella determinar cualitativamente las zonas de recarga, la dirección del flujo del agua subterránea, así como tener idea de algunas propiedades físicas del acuífero, se elaboran configuraciones de las determinaciones efectuadas.

Con el objeto de ilustrar este punto, en las Figs. 7 y 8 se muestran las configuraciones de sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica, para los Valles de Aldama y Samalayucan, Chih.

En el plano de curvas isovalores de sólidos totales disueltos de Aldama, se observa que las zonas con menores concentraciones se encuentran en el extremo noreste de la ciudad de Chihuahua y en el flanco este de la Sierra de La Gloria, coincidiendo

do éstas con las zonas de recarga del acuífero, donde el agua de lluvia se infiltra.

Las concentraciones aumentan de la ciudad de Chihuahua hacia la de Aldama, indicando que el agua subterránea fluye en dicha dirección al ir disolviendo sales conforme avanza.

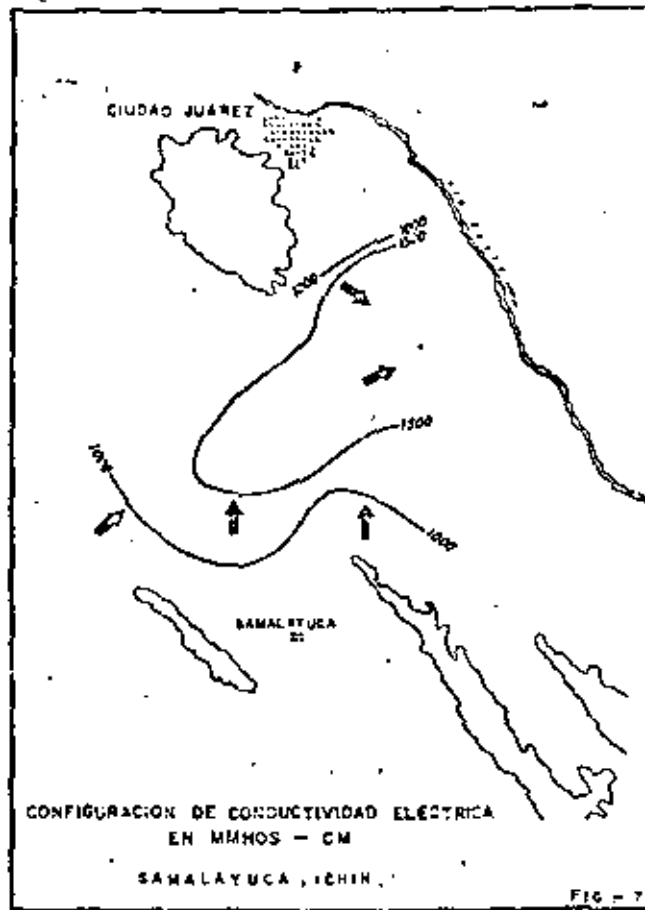
Las concentraciones aumentan de la Sierra de La Gloria, hacia el noreste y después hacia el sureste, a lo largo del río Chuiscar, mostrando que la dirección del agua subterránea es hacia el sureste.

En la configuración de conductividades del área Samalayuca-Juárez, (Fig. 8) se observa la curva 1000 al pie de la Sierra de Juárez y de 1500 hacia el suroeste de ella. Esta distribución, indica que la Sierra de Juárez corresponde a una zona de recarga, donde el agua de lluvia se infiltra y fluye hacia el sureste. Observaciones similares se hacen en Samalayuca, donde se deduce un flujo de agua de sur a norte y noreste, uniéndose con el de la Sierra de Juárez, para continuar hacia el Río Bravo.

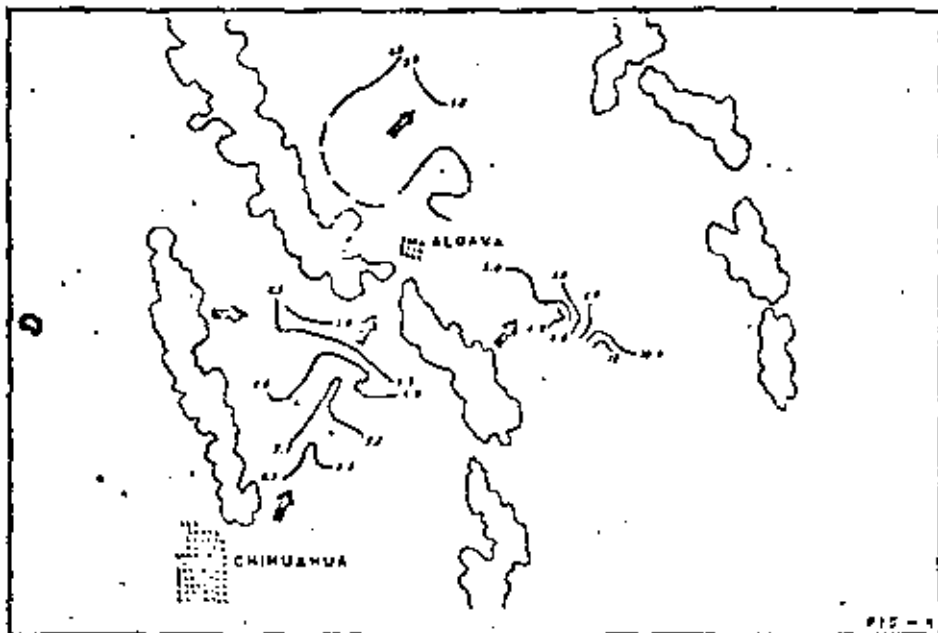
Por lo tanto, de estas configuraciones se obtiene, entre otras cosas, la zona de alimentación del acuífero y dirección del flujo, el cual coincide con el encontrado por métodos piezométricos.

En la Fig. 9 se muestra un corte geológico ilustrativo, que relaciona la zona de recarga y la dirección del movimiento del agua subterránea, con la concentración y composición química del agua.

- c) Diagramas triangulares. - Con el objeto de obtener, en forma rápida e ilustrativa, los diferentes tipos o familias de agua, de acuerdo al catión y anión predominante, se forman diagramas triangulares, como el que se muestra en la Fig. 10. En el triángulo de la izquierda de este diagrama se grafican, en porcentaje de me/l, los principales cationes y, en el triángulo de la derecha, también en las mismas unidades, los principales aniones. En los vértices de estos triángulos se definen aguas cálcicas, magnesianas, bicarbonatadas, etc., si las muestras se encuentran localizadas en los vértices con los por-



CONFIGURACION DE SOLIDOS TOTALES EN M.E.A.: CHIHUAHUA-ALCAMA, CHH.



ILUSTRACION QUE MUESTRA LA RELACION ENTRE LA ZONA DE RECARGA Y LA DIRECCION DEL MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRANEA, CON LA CONCENTRACION Y COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA

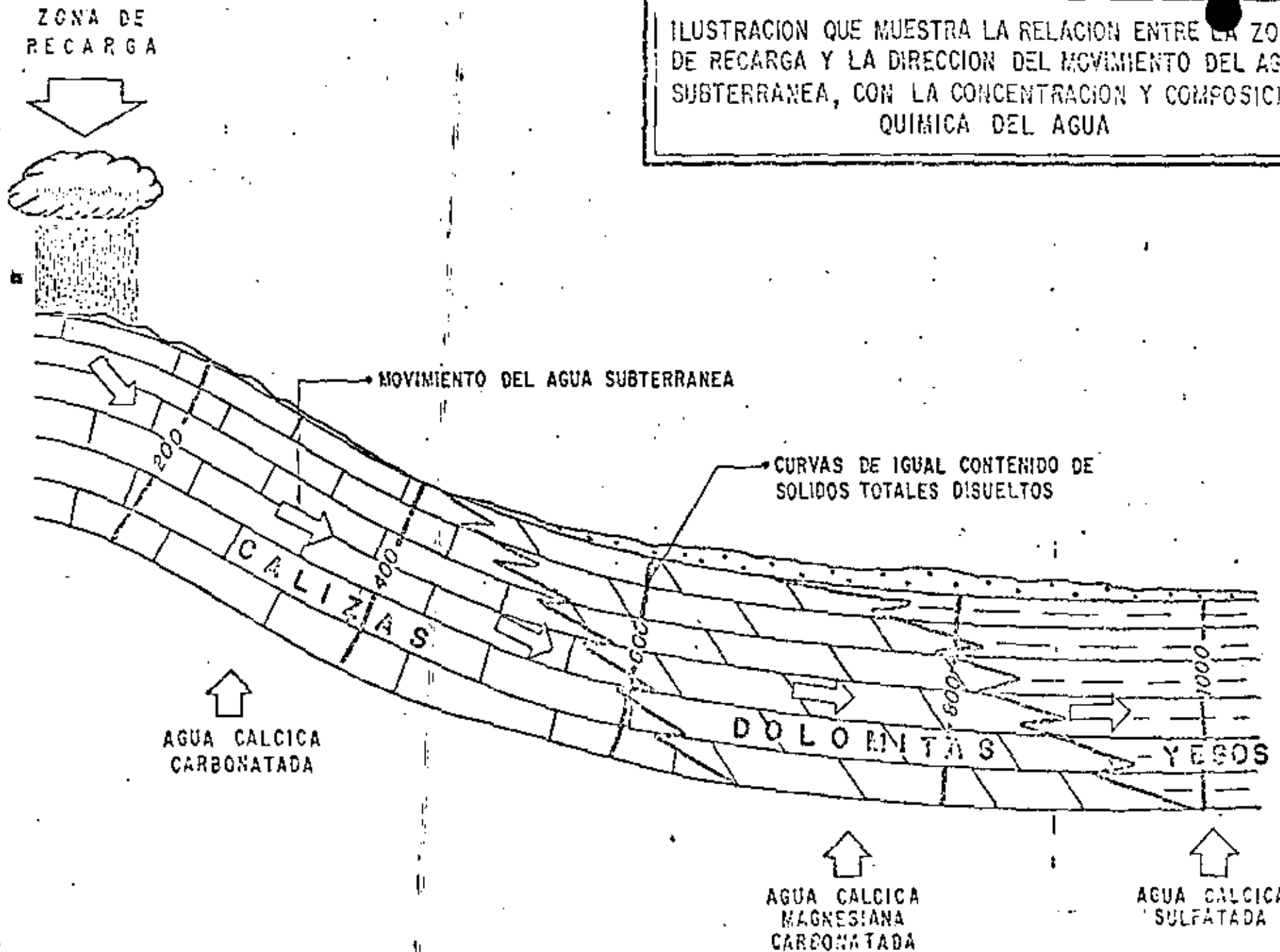


FIG - 9

DIAGRAMA TRIANGULAR

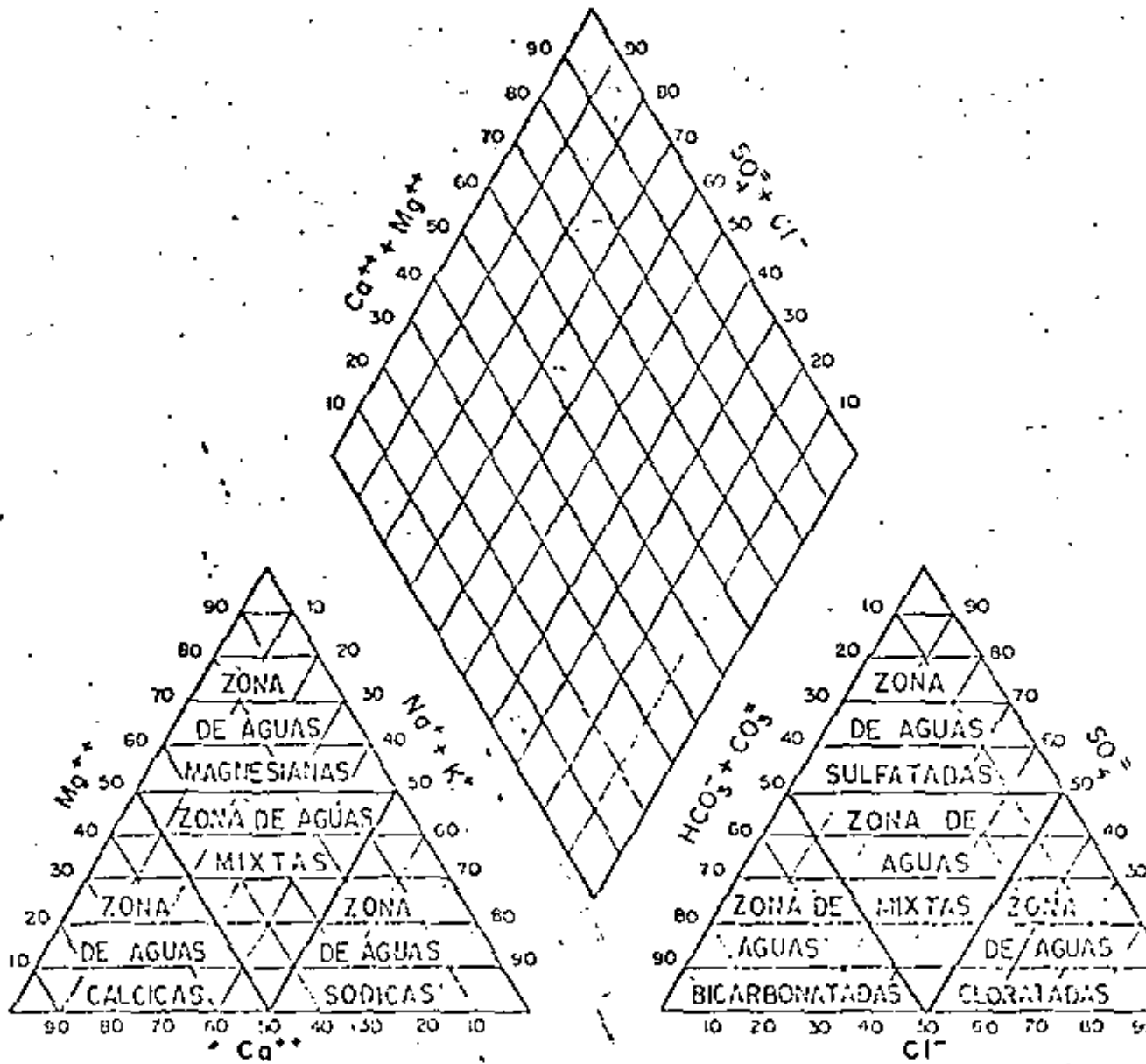


FIG. - 10

centajes mayores al 50% de calcio, magnesio, bicarbonato, etc., respectivamente. Se define como - - agua mixta, la que se grafica al centro del triángulo, por no existir un ion que predomine.

En la Fig. 11 se muestra un diagrama triangular, - en el cual se graficaron muestras de agua del Valle de Tecomán-Manzanillo, Col., observándose la existencia de agua de tipo sódico-clorurada, mixta-mixta y cálcico-bicarbonatada.

El tipo o familia de agua, se vacía sobre un plano delimitando zonas con agua de diferente composición. En la Fig. 12 se muestra el plano correspondiente al diagrama triangular de la zona de Tecomán-Manzanillo, en el cual se delimitaron las zonas correspondientes a las familias de agua ya mencionadas. El agua sódico-clorada, es consecuencia directa de contaminación del acuífero, con - - agua de mar. El agua mixta-mixta, es una mezcla de aguas de diferentes tipos y en la cual no predomina ningún ion en especial. El agua cálcico-bicarbonatada, es el producto de la disolución de rocas calizas por el agua.

- d) Resistividades y sólidos totales disueltos. - La resistividad es una medida indirecta de los sólidos totales disueltos (S.T.D.) que contiene el - - agua, ya que sus valores son inversamente proporcionales a éstos últimos. Tomando en cuenta esta característica, se forma una gráfica (Fig. 13) con la cual, se pueden calcular resistividades a partir de sólidos totales disueltos, o viceversa. Los sólidos totales disueltos calculados, en algunos casos, nos ayudan a complementar la información de configuraciones de una forma rápida y económica. Las resistividades calculadas, se pueden utilizar para hacer correlaciones con geofísica

En la Fig. 17, se muestra un ejemplo de la relación entre resistividad y S.T.D., el cual corresponde al área de Sonoyta, Son. En ella se encuentra que, en ciertos lugares, el agua subterránea tenía concentraciones de S.T.D., muy altas y se encontraba rodeado por pozos con agua de mejor calidad. Se efectuaron sondeos geofísicos de resisti-

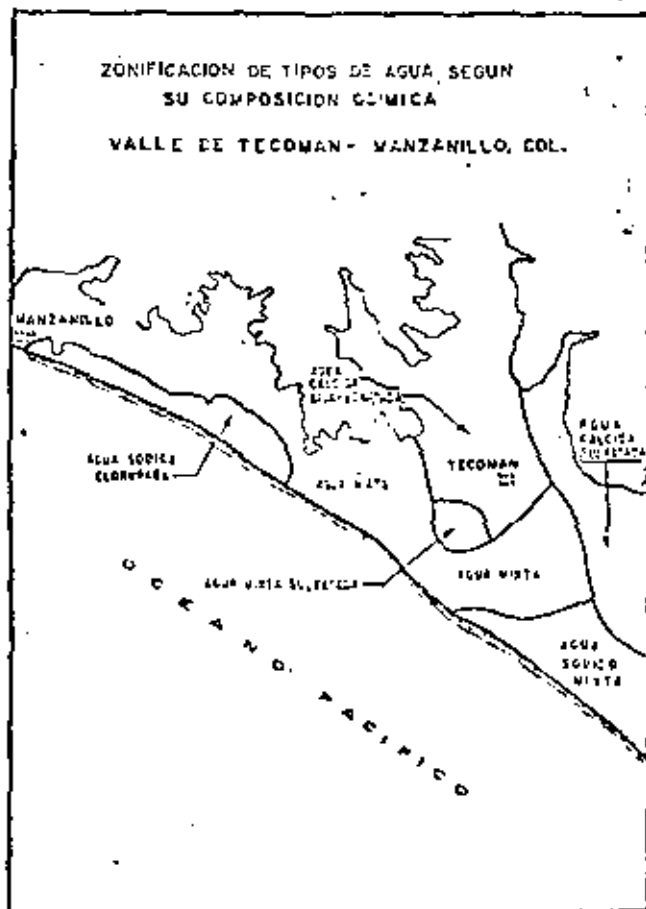
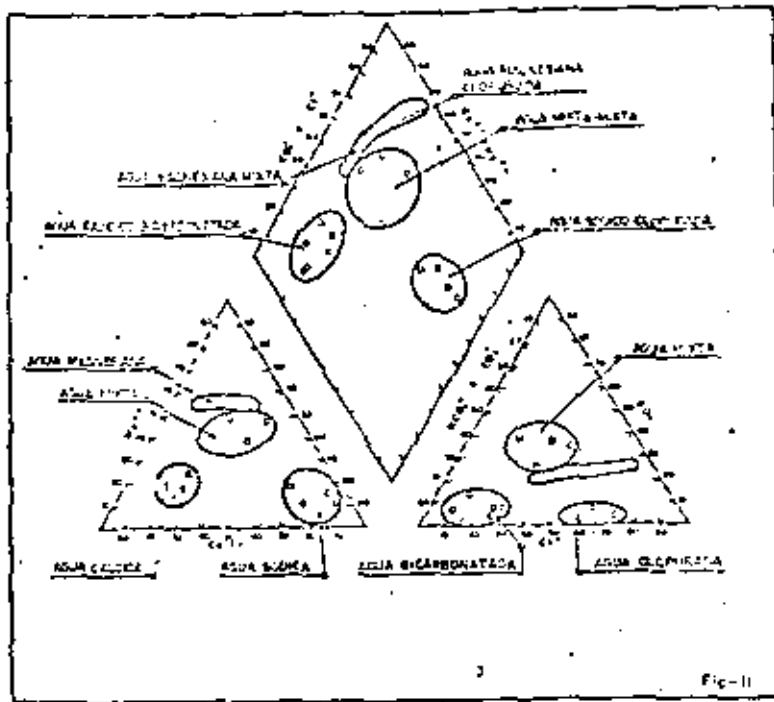


FIG 12

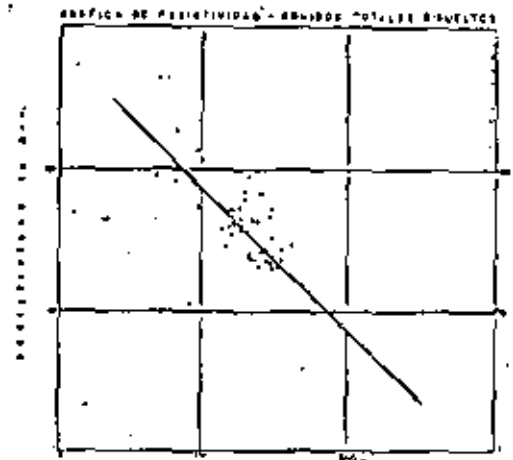


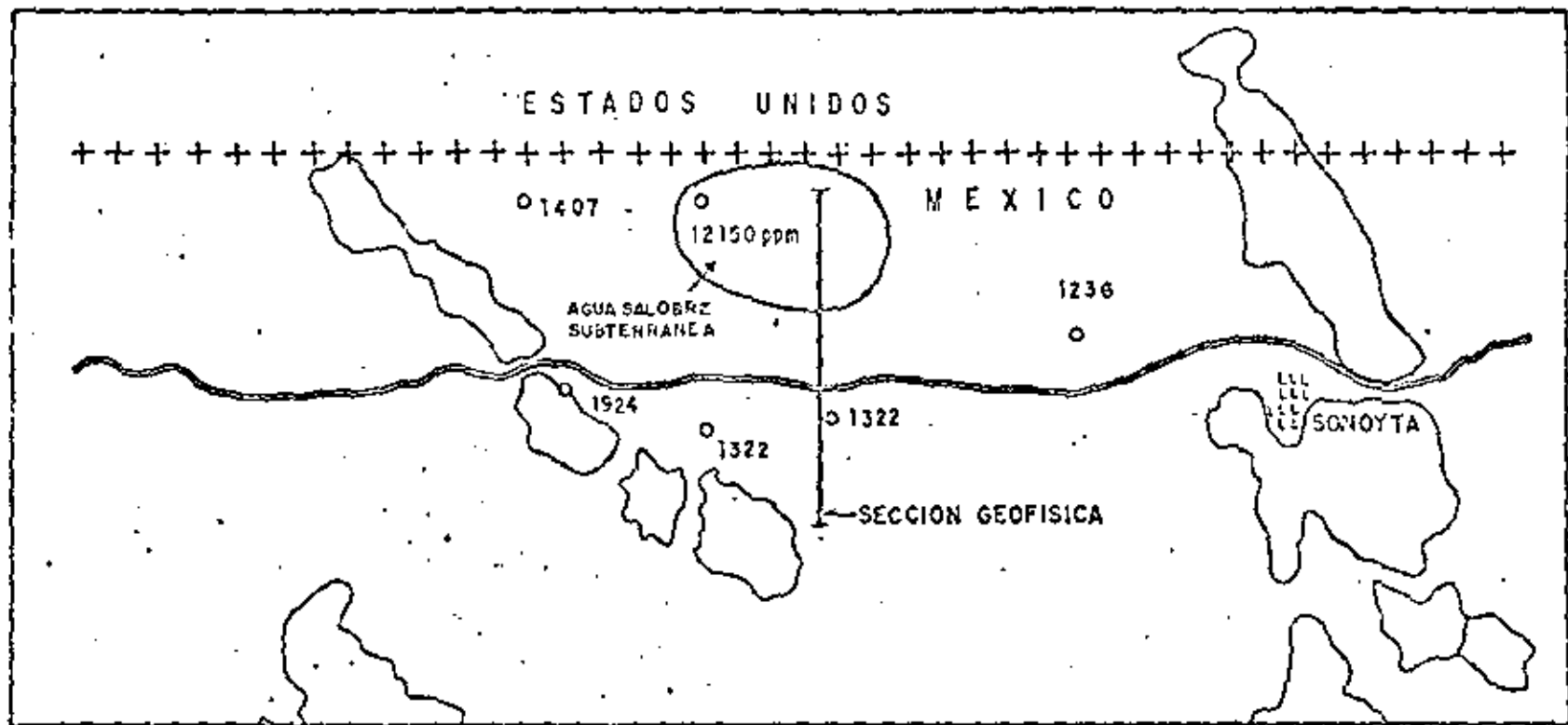
FIG 13

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO.
ZONA IXTLERA DEL ESTADO DE ZACATECAS

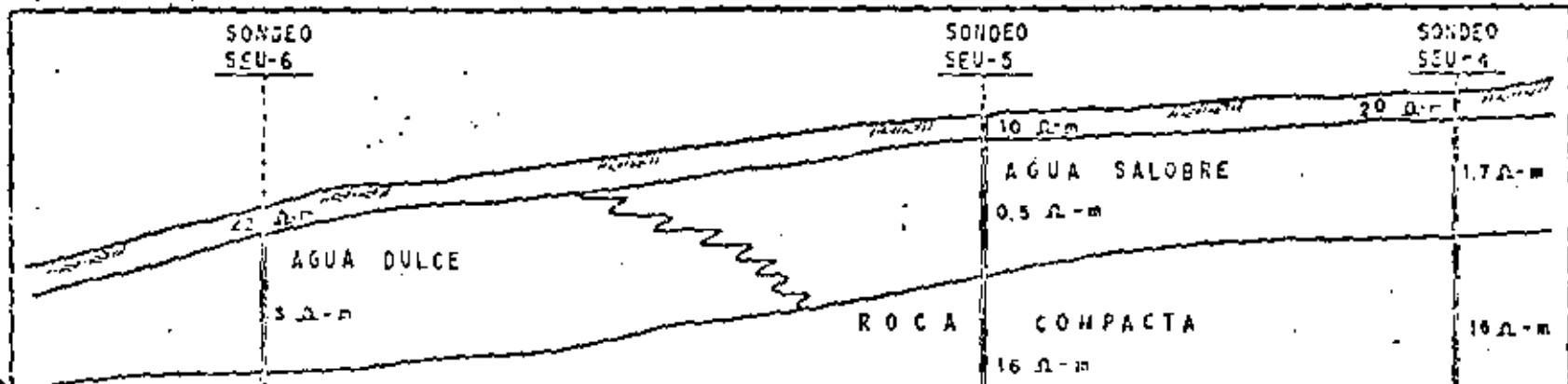
MUESTRA Nº	DENOMINACIÓN	E.E. (mm)	PES (g)	PUNTO DE FUSIÓN (°C)	DENSIDAD (g/cm³)	CANTIDAD TOTAL (g)	C		H		N		S		NaCl		SO₄		Ca		Mg		Fe		Pb		FAMILIA DE AGUA	FAMILIA DE AGUA	P	
							ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm				ppm
101

FIG. - 16

DETERMINACION DE MANTOS DE AGUA SALOBRE SEPULTADOS, POR MEDIO DE GEOFISICA E HIDROGEOQUIMICA



SECCION GEOFISICA



vidad, los cuales, al ser interpretados, mostraron la existencia de lentos localizados de muy baja resistividad, los cuales corresponden a agua salobre atrapada entre los sedimentos.

Existen otros tipos de clasificación y representación de análisis químicos, como las de Chase Palmer, Shoeller, Souline, Wilcox, etc.

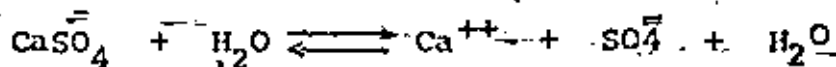
IV. GRADO DE SATURACION DEL AGUA CON RESPECTO A LOS MINERALES MAS COMUNES

Cuando algunas muestras presentaron altas concentraciones de sólidos totales, se procede a hacer un análisis del grado de saturación del agua con respecto a los minerales más comunes: yeso $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Calcita CaCO_3 dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

4.1. METODOLOGIA

Para obtener el grado de saturación de una sal en el agua, se obtiene la constante de actividad iónica (K_{ai}) y se compara con la constante de equilibrio (K_e). Para valores de (K_{ai}) mayores que (K_e), la muestra se encuentra sobresaturada y para valores de (K_{ai}) menores que (K_e), la muestra no se encuentra sobresaturada.

En el caso del yeso, este se disocia según la siguiente reacción:



Aplicando la ley de Acción de Masas, obtenemos que la constante de actividad iónica es igual a las actividades de los productos entre los reactantes, o sea:

$$K_{ai} = \frac{[\text{Ca}^{++}] [\text{SO}_4^{--}] [\text{2H}_2\text{O}]}{[\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}]}$$

Donde los paréntesis indican la actividad iónica del ion -- que en encierran.

La actividad de los compuestos, es igual a 1. -- por lo tanto:

$$K_{ai} = [Ca^{++}] [SO_4^{--}] \text{ --- (1)}$$

De manera similar para la calcita se tiene:

$$CaCO_3 = Ca^{++} + CO_3^{--}$$

$$K_{ai} = [Ca^{++}] [CO_3^{--}] \text{ --- (2)}$$

Debido a que los análisis no reportan carbonato, (CO_3^{--}), se utilizó la determinación de bicarbonato (HCO_3^-), sustituyendo la fórmula (2) de la siguiente manera:

$$HCO_3^- \rightleftharpoons CO_3^{--} + H^+$$

$$K_{ai} = \frac{[CO_3^{--}] [H^+]}{[HCO_3^-]} = 10^{-10.33}$$

Despejando:

$$[CO_3^{--}] = \frac{[HCO_3^-] \cdot 10^{-10.33}}{[H^+]}$$

Sustituyendo en la ecuación (2):

$$K_{ai} = \frac{[Ca^{++}] [HCO_3^-] 10^{-10.33}}{[H^+]} \text{ --- (3)}$$

Las actividades iónicas se obtienen multiplicando el coeficiente de actividad iónica (γ) de cada elemento, por la concentración en moles por litro (M).

$$\begin{aligned} \text{O sea: } [Ca^{++}] &= \gamma_{Ca} \cdot M_{Ca} \\ [SO_4^{--}] &= \gamma_{SO_4} \cdot M_{SO_4} \\ [HCO_3^-] &= \gamma_{HCO_3} \cdot M_{HCO_3} \end{aligned}$$

Las concentraciones en moles por litro (M) se obtienen dividiendo las partes por millón reportadas en los análisis químicos por el peso atómico. El coeficiente de actividad iónica (γ) se calculó mediante la fórmula de Debye-Huckel:

$$\log \gamma = \frac{-A z_i^2 \sqrt{I}}{1 - B a_i \sqrt{I}}$$

Donde Z es la carga del ion; A y B son constantes dependientes de la temperatura (en nuestro caso a 25°C, A = 0.5085 y B = 0.3281 x 10⁸; (Klots, 1950); a_i es una constante relacionada con el tamaño y carga del ion (HEM, 1970) I es la fuerza iónica calculada por la fórmula:

$$I = \frac{1}{2} (M \cdot Z^2)$$

Donde M es la concentración de cada ion en moles por litro.

La constante de actividad iónica (K_ai), así obtenida, se compara con la constante de equilibrio (K_e), para encontrar el grado de saturación del agua con respecto a yeso y calcita.

Los valores de K_e son: (Garrel y Chist, 1965):

$$K_e \text{ (calcita)} = 10^{-8.34}$$

$$K_e \text{ (yeso)} = 10^{-4.61}$$

De manera similar, se procede para el cálculo de las constantes de otros minerales.

Ya obtenido el grado de saturación, se delimitan, sobre planos, las áreas sobresaturadas, a partir de las cuales, se deduce la dirección del movimiento del agua subterránea y se explica el comportamiento químico del agua.

En las zonas en donde el agua se encuentra sobresaturada de alguna sal, es de esperarse la precipitación de dicho compuesto y consecuentemente, la incrustación en bombas, tuberías, calderas y demás material que tenga contacto con esta agua. Mientras que las áreas en donde el agua no se encuentre saturada de sales, ésta continuará disolviendo y aumentando su concentración iónica.

GENERALIDADES SOBRE LA INTRUSION SALINA
EN ACUIFEROS COSTEROS Y METODOS DE CONTROL.

La explotación de agua subterránea en acuíferos de zonas costeras encara un gran riesgo, denominado "Intrusión salina". Muchas de las zonas costeras de México están siendo degradadas por este fenómeno, como resultado del exceso de bombeo.

Un renglón importante en los acuíferos costeros, es el estudio de la determinación de la intrusión salina cuando ésta aún no la ha afectado nocivamente. Dentro de estos estudios, es esencial, la determinación de la posición del nivel piezométrico y sus fluctuaciones con el tiempo, así como el registro de los incrementos de salinidad en los pozos. Si se cuenta con estos datos puede conocerse rápidamente la posición y la peligrosidad de la intrusión y planear las alternativas más convenientes para su control.

CARACTERISTICAS FISICAS DE LA INTRUSION SALINA.

Para que una zona costera se vea afectada por este fenómeno, es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes:

- a) Continuidad Hidráulica.- En muchas cuencas costeras de nuestro país, existe continuidad hidráulica en los materiales que forman las planicies costeras la cual se continúa hasta el mar, cerca de la línea de la costa. Puede presentarse también, capas de material permeable confinado, que se continúa a cierta profundidad, hasta más allá de la costa. Algunos acuíferos se encuentran cubiertos por lodo y otros materiales relativamente impermeables que impiden que el agua de mar los contamine.
- b) Inversión del Gradiente.- Otras de las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la intrusión salina, es la inversión del gradiente, la cual, se presenta cuando la carga hidráulica del mar es mayor a la del acuífero. Esto sucede si el nivel piezométrico es abatido a profundidades bajo el nivel del mar.

Cuando el gradiente es hacia el mar, existe un flujo de agua hacia él y cuando el gradiente es hacia tierra adentro se establece un flujo de agua, hacia el valle. En la

práctica, la magnitud el gradiente hidráulico se obtiene a partir de la medición de la profundidad al nivel del agua en pozos y norias.

PRINCIPIO DE GHYBEN - HERZBERG.

A lo largo de las líneas de costa el agua de los acuíferos se encuentra descansando sobre el agua de mar, debido a la diferencia de densidades de éstas. El contacto entre estas dos masas de agua (interfase salina) se encuentra en equilibrio dinámico, por lo cual las modificaciones en las condiciones originales del acuífero, producen cambios en la posición del contacto entre las dos aguas.

La profundidad a la cual se encuentra la interfase fue descrita por Badon Ghyben en 1869, y aplicada a problemas específicos por Bairat Herzberg en 1901.

La teoría se basa en lo siguiente:

El peso de una columna vertical de agua dulce que va desde el nivel piezométrico del acuífero hasta la interfase se encuentra equilibrada por el peso de una columna de agua de mar que vaya desde el nivel del mar, hasta la interfase. Esto es, el peso de la columna de agua dulce de longitud $h + Z$ es igual al peso de una columna de agua de mar de longitud Z , donde "h" es la elevación del nivel estático a partir del nivel del mar y "Z" es la profundidad a la interfase, a partir del mismo nivel de referencia.

Si "Dd" y "Dm" representan las densidades del agua dulce y de mar respectivamente, la condición para el balance hidrostático se expresa de la siguiente manera:

$$D_m \cdot g \cdot Z = D_d \cdot g \cdot (h + Z)$$

$$Z = \frac{D_d}{D_m - D_d} h$$

Considerando que las densidades del agua de mar y del agua dulce son 1.025 y 1.000, respectivamente, tenemos que:

$$Z = 40 h$$

O sea que por cada metro que se eleve el nivel piezométrico sobre el nivel del mar, existirán 40 metros de agua dulce bajo el mismo nivel de referencia (Figura 2). La posición del nivel piezométrico sobre el mar, condiciona la profundidad a la interfase. Los movimientos de la superficie del mar por mareas y de la superficie piezométrica del acuífero, producidos por aumento ó disminución de agua en él, pro-

ducen fluctuaciones en la posición de la interfase. El área en donde se llevan a cabo estas fluctuaciones, se denominan zona de difusión. La mayoría de los acuíferos que no están sobreeplotados, descargan agua hacia el mar y la posición real de la interfase, en este caso, se encuentra a mayor profundidad (Hubbert) que la calculada por Ghyben-Herzberg, (figura 3).

MECANISMO DE LA INTRUSION SALINA.

Existen varios mecanismos por los cuales el agua de mar puede intrusionar a un acuífero costero. Estos, están relacionados con la disminución de la elevación del nivel piezométrico y la inversión del gradiente hidráulico, que permite al agua de mar moverse hacia tierra adentro. Bajo condiciones naturales en los acuíferos costeros, existe un equilibrio entre la recarga, la descarga y el cambio del almacenamiento. Es conveniente que exista un flujo de agua dulce al mar, para conservar el equilibrio, y evitar la intrusión. Conforme el agua subterránea es extraída por bombeo, el nivel estático baja acomodándose a las nuevas condiciones y el flujo de la intrusión salina se comienza a mover hacia el acuífero, ocupando primero las zonas costeras y posteriormente la zona de explotación del valle.

MÉTODOS DE CONTROL DE LA INTRUSION SALINA.

Varios métodos de control son conocidos y utilizados para prevenir la intrusión salina. Los más comunes son:

- 1).- Reducción de la extracción
- 2).- Recarga artificial,
- 3).- Fronteras impermeables.
- 4).- Barrera con pozos de bombeo y
- 5).- Barreras con pozos de inyección (figura 4).

REDUCCION DE LA EXTRACCION.

Una de las medidas técnicamente más sencillas para prevenir la intrusión de agua de mar, es la reducción de la extracción de agua subterránea, a un nivel planificado. Esta medida implica una disminución en las demandas de agua lo cual, en ocasiones crea problemas socioeconómicos y políticos muy fuertes. Cuando se opta por este método y el bombeo es reducido, puede establecerse nuevamente el gradiente hacia el mar y la intrusión es reemplazada por un ligero flujo de agua dulce hacia el mar. Si existe información suficiente sobre la variación de los niveles del agua y si se conocen las condiciones geológicas del subsuelo, la reducción de la extracción puede ser controlada de tal manera, que se obtenga la máxima cantidad de agua sin provocar una intrusión salina nociva.

práctica, la magnitud el gradiente hidráulico se obtiene a partir de la medición de la profundidad al nivel del agua en pozos y norias.

PRINCIPIO DE GHYBEN - HERZBERG.

A lo largo de las líneas de costa el agua de los acuíferos se encuentra descansando sobre el agua de mar, debido a la diferencia de densidades de éstas. El contacto entre estas dos masas de agua (interfase salina) se encuentra en equilibrio dinámico, por lo cual las modificaciones en las condiciones originales del acuífero, producen cambios en la posición del contacto entre las dos aguas.

La profundidad a la cual se encuentra la interfase fue descrita por Badon Ghyben en 1869, y aplicada a problemas específicos por Bairat Herzberg en 1901.

La teoría se basa en lo siguiente:

El peso de una columna vertical de agua dulce que va desde el nivel piezométrico del acuífero hasta la interfase se encuentra equilibrada por el peso de una columna de agua de mar que vaya desde el nivel del mar, hasta la interfase. Esto es, el peso de la columna de agua dulce de longitud $h + Z$ es igual al peso de una columna de agua de mar de longitud Z , donde "h" es la elevación del nivel estático a partir del nivel del mar y "Z" es la profundidad a la interfase, a partir del mismo nivel de referencia.

Si "Dd" y "Dm" representan las densidades del agua dulce y de mar respectivamente, la condición para el balance hidrostático se expresa de la siguiente manera:

$$D_m \cdot g \cdot Z = D_d \cdot g \cdot (h + Z)$$

$$Z = \frac{D_d}{D_m - D_d} h$$

Considerando que las densidades del agua de mar y del agua dulce son 1.025 y 1.000, respectivamente, tenemos que:

$$Z = 40 h$$

O sea que por cada metro que se eleve el nivel piezométrico sobre el nivel del mar, existirán 40 metros de agua dulce bajo el mismo nivel de referencia (Figura 2). La posición del nivel piezométrico sobre el mar, condiciona la profundidad a la interfase. Los movimientos de la superficie del mar por mareas y de la superficie piezométrica del acuífero, producidos por aumento ó disminución de agua en él, pro-

ducen fluctuaciones en la posición de la interfase. El área en donde se llevan a cabo estas fluctuaciones, se denominan zona de difusión. La mayoría de los acuíferos que no están sobreexplotados, descargan agua hacia el mar y la posición real de la interfase, en este caso, se encuentra a mayor profundidad (Hubbert) que la calculada por Ghyben-Herzberg, (figura 3).

MECANISMO DE LA INTRUSION SALINA.

Existen varios mecanismos por los cuales el agua de mar puede intrusionar a un acuífero costero. Estos, están relacionados con la disminución de la elevación del nivel piezométrico y la inversión del gradiente hidráulico, que permite al agua de mar moverse hacia tierra adentro. Bajo condiciones naturales en los acuíferos costeros, existe un equilibrio entre la recarga, la descarga y el cambio del almacenamiento. Es conveniente que exista un flujo de agua dulce al mar, para conservar el equilibrio, y evitar la intrusión. Conforme el agua subterránea es extraída por bombeo, el nivel estático baja acomodándose a las nuevas condiciones y el flujo de la intrusión salina se comienza a mover hacia el acuífero, ocupando primero las zonas costeras y posteriormente la zona de explotación del valle.

METODOS DE CONTROL DE LA INTRUSION SALINA.

Varios métodos de control son conocidos y utilizados para prevenir la intrusión salina. Los más comunes son:

- 1).- Reducción de la extracción
- 2).- Recarga artificial,
- 3).- Fronteras impermeables.
- 4).- Barrera con pozos de bombeo y
- 5).- Barreras con pozos de inyección (figura 4).

REDUCCION DE LA EXTRACCION.

Una de las medidas técnicamente más sencillas para prevenir la intrusión de agua de mar, es la reducción de la extracción de agua subterránea, a un nivel planificado. Esta medida implica una disminución en las demandas de agua lo cual, en ocasiones crea problemas socioeconómicos y políticos muy fuertes. Cuando se opta por este método y el bombeo es reducido, puede establecerse nuevamente el gradiente hacia el mar y la intrusión es reemplazada por un ligero flujo de agua dulce hacia el mar. Si existe información suficiente sobre la variación de los niveles del agua y si se conocen las condiciones geológicas del subsuelo, la reducción de la extracción puede ser controlada de tal manera, que se obtenga la máxima cantidad de agua sin provocar una intrusión salina nociva.

RECARGA ARTIFICIAL.

Para ello es necesario contar con una fuente adicional de agua así como condiciones apropiadas del terreno, de tal manera, que la recarga pueda llevarse a cabo. Las obras para la recarga pueden consistir en zanjas superficiales construidas en el área de recarga a través de las cuales se hace circular agua que se infiltra al subsuelo. Otro tipo de obras, consiste en la construcción de presas de infiltración, localizadas en la zona de recarga. En zonas donde existen capas confinantes impermeables, pueden construirse pozos de inyección. Al llevar a cabo esta recarga se provoca la reversión del gradiente hacia el mar, la cual es acompañada por un flujo de agua dulce. La recarga, en esta forma, es económica, respecto a los otros métodos, pero en la mayoría de los casos no se cuenta con fuentes de agua adicional para llevarla a cabo.

FRONTERAS IMPERMEABLES.

Consiste en la construcción de una barrera impermeable entre la línea de costa y los pozos de explotación. El medio de construcción puede ser excavando una zanja que posteriormente se rellena con materiales arcillosos. Otro tipo de barrera, consiste en el inyectado de material impermeable. Estas construcciones son usadas solo en áreas relativamente someras. Es importante, el conocer los resultados posteriores a su construcción, ya que, si la impermeabilización es completa, permitirá abatimientos fuertes y por lo tanto la obtención de mayores volúmenes de agua almacenada. Este método tiene la desventaja de no contar con un flujo de agua subterránea hacia fuera de la zona, que en ocasiones, es necesario para mantener un balance de sales favorables.

BARRERA DE POZOS DE BOMBEO.

Consiste en una línea de pozos localizados entre la zona de explotación del valle y el mar. Los pozos, deben de extraer toda el agua de mar que intrusióna al acuífero, hasta obtener un equilibrio hidrostático. Para ello, los niveles de agua deben de ser bajados en la barrera, más que en cualquier otro punto en la cuenca. El volumen de extracción que se lleva a cabo en el valle, debe de ser reducido, cuando menos una cantidad ligeramente menor a la que se obtenía antes de aplicar el método. Es importante, disponer del registro de los niveles del agua en la zona de la barrera, así como el conocer la cantidad exacta de agua que se debe de bombear para obtener los resultados deseados. Esta cantidad de agua que se debe de extraer, es muy variable y deberá de ser mayor

al volumen de agua de mar que originalmente intruía. -
Mientras más cerca del mar se localiza la barrera, el bombeo
tendrá que ser mayor.

BARRERA CON POZOS DE INYECCION.

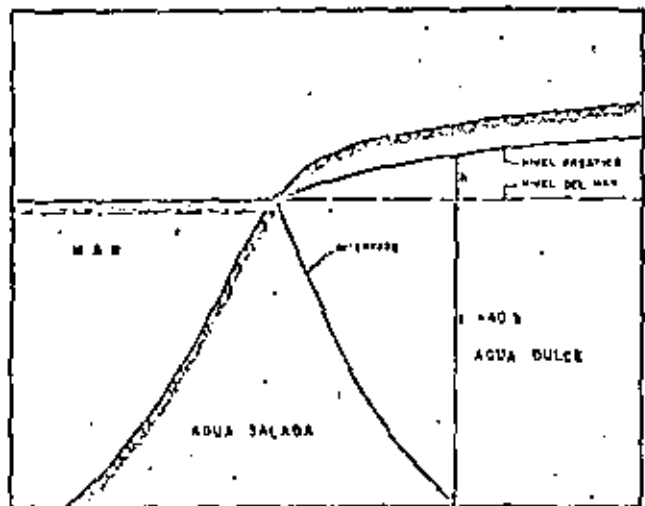
Este método para control de intrusiones salinas, -
consiste en la construcción de pozos de inyección alineados -
a lo largo de la costa, su funcionamiento va a depender de la
resistencia que encuentre el agua al moverse en el subsuelo. -
Al inyectar agua al acuífero se provoca la elevación del ni-
vel piezométrico lo cual se lleva a cabo hasta alcanzar el --
gradiente requerido. Debido a la diferencia en densidad en-
tre el agua de mar y el agua dulce, se requiere una columna -
de 41 metros de agua dulce para equilibrar una columna de 40
metros de agua salada. Para controlar la intrusión es neces-
ario primeramente determinar el espesor de sedimentos permea-
bles. Posteriormente se construye la barrera de pozos de in-
yección y se provoca la elevación del nivel piezométrico a lo
largo de la línea de pozos, hasta alcanzar una altura de 75 -
centímetros arriba del nivel del mar, por cada 30 metros de -
espesor del acuífero bajo el mismo nivel de referencia. La -
cantidad de agua utilizada para dicho fenómeno puede ser esti-
mada. Después de que en la barrera con pozos de inyección, -
se establece un equilibrio, la cantidad de agua que fluye ha-
cia el acuífero, será la cantidad de agua de mar que intruía
anteriormente, siempre y cuando la explotación de la pla-
nicie se haya conservado igual. Para mantener el balance di-
námico de esta zona, es necesario que exista un pequeño flujo
de agua dulce hacia el mar. La magnitud de este flujo es va-
riable, pero será de alrededor del 10% de la que fluye hacia
el acuífero. El número de pozos requeridos para formar la ba-
rreira dependerá de las características hidráulicas del acuífe-
ro, en especial de la capacidad específica de un pozo de bom-
beo perforado en la zona.

METODO COMBINADO: BARRERA POR POZOS DE BOMBEO BARRERA POR PO- ZOS DE INYECCION.

Este método utiliza la combinación de los dos méto-
dos anteriores. Para ello, la barrera por pozos de bombeo, -
es localizada entre la línea de costa y la zona de explotación
del valle y la barrera por pozos de inyección se ubica tierra
adentro, del otro lado de la zona de explotación. La barrera
combinada, compuesta de los dos sistemas, operando simultánea-
mente, minimizada los efectos de subsidencia y extracción de
agua, así como otros efectos secundarios y permite una mayor
flexibilidad en su operación sobre la de uno solo de los sis-

temas previamente descritos.

NOTA : Para la elaboración de este artículo, se utilizaron datos de diferentes textos y trabajos, principalmente de los apuntes del curso de hidrología subterránea del Departamento de Recursos Hidráulicos del Estado de California, E.U., por Raymond C. Richter.



INTRUSION SALINA SEGUN LA TEORIA DE G.HERZBERG

FIG- 1

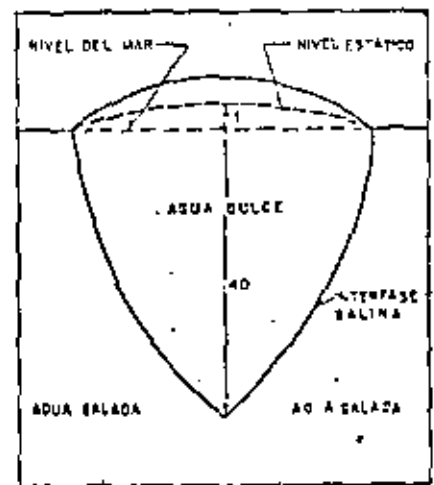
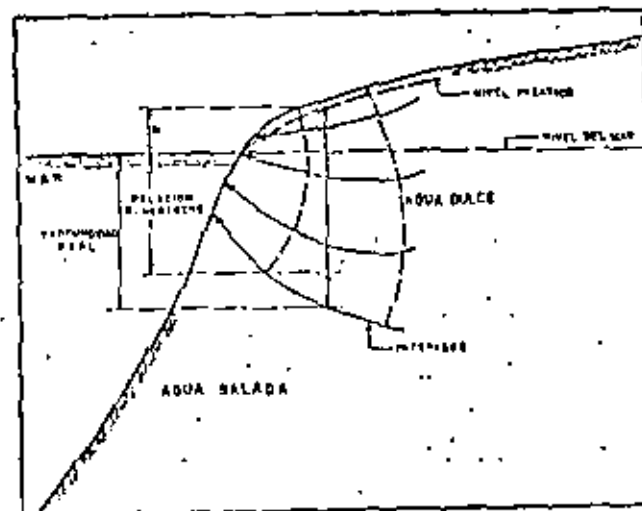


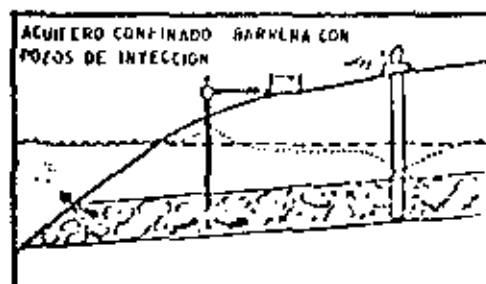
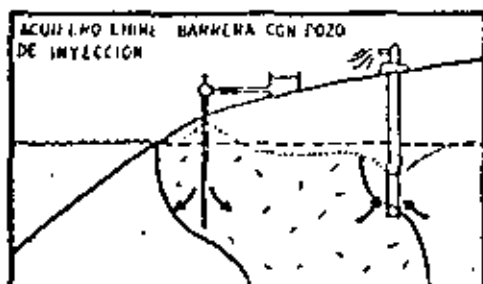
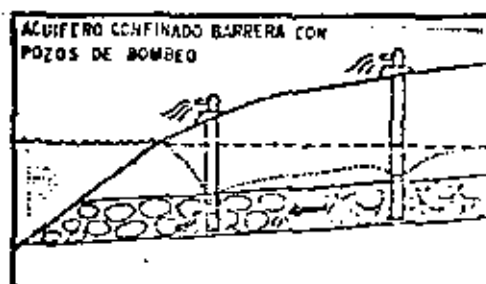
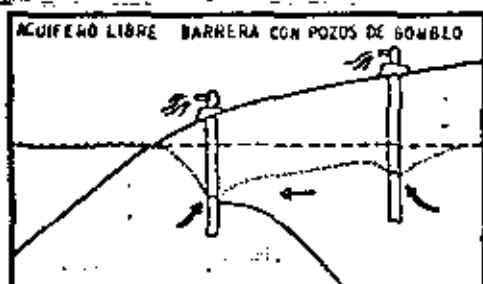
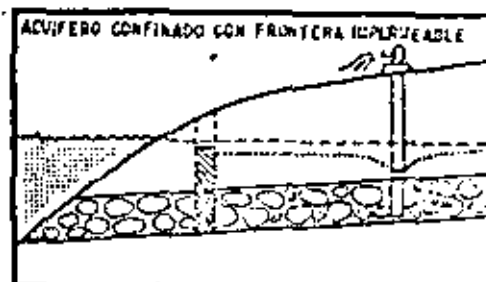
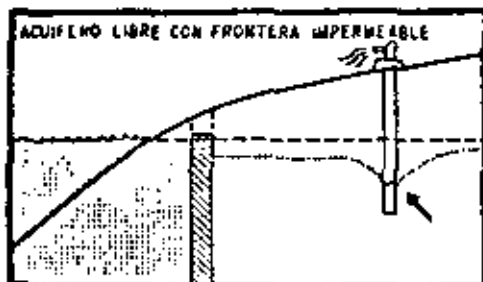
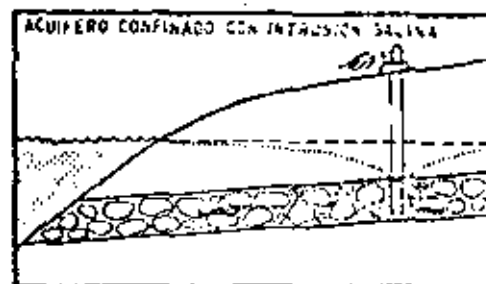
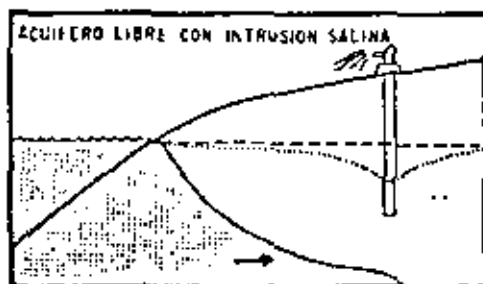
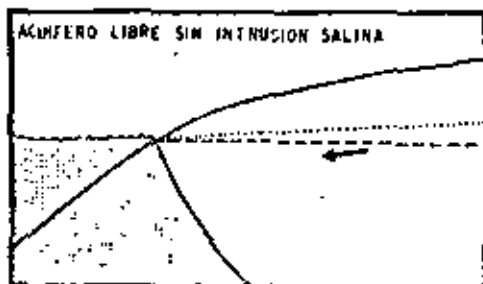
FIG: 2 POSICION DE LA INTERFASE SALINA EN UNA ISLA



DISCREPANCIA ENTRE LA PROFUNDIDAD REAL A LA INTERFASE Y LA CALCULADA POR G.HERZBERG.

FIG- 3

DIFERENTES ASPECTOS DE LA INTRUSION SALINA



NIVEL PILOMETRICO NIVEL DEL MAR ----- AGUA DULCE [] AGUA SALADA [] AGUA INYECTADA []

CALIDAD DEL AGUA Y SIGNIFICADO DE
ALGUNAS DE SUS PROPIEDADES
FÍSICAS Y QUÍMICAS.

Las aguas subterráneas y superficiales que son utilizadas para satisfacer las necesidades de agua potable de zonas urbanas, así como la que se destina a la agricultura, ganadería e industria, necesita cumplir con ciertos requisitos respecto a su contenido de elementos químicos, a sus propiedades físicas y a la presencia de materia orgánica.

El objeto del presente trabajo, es el de mostrar, en forma general, las normas de calidad del agua utilizada como potable, en riego, en abrevadero y en la industria, así como el significado y algunas propiedades físicas y químicas del agua.

La calidad del agua, se determina a partir de análisis físicos, químicos y bacteriológicos, los cuales pueden variar desde análisis sencillos donde se determinan los principales elementos, hasta análisis complejos que incluyan la determinación de una gran variedad de especies presentes en el agua.

El tipo de análisis dependerá del uso que se le tenga destinado al agua, así como de algunas características observadas en la zona donde ésta se encuentre. Por ejemplo, en una zona minera, es conveniente determinar las concentraciones de algunos metales que pudieran encontrarse presentes. En lugares próximos a poblados y/o establos, debe ponerse atención a los contenidos de nitratos y organismos coliformes, etc.

AGUA POTABLE. -

Para conocer la calidad de cierta agua para uso potable, se comparan los resultados del análisis químicos, con las normas de calidad o límites máximos permisibles que a continuación se describen y que fueron publicados por la Secretaría de Salubridad-

y Asistencia, en el Diario Oficial de el día 2 de Julio de 1953.

CARACTERISTICAS FISICAS	LIMITES MAXIMO PERMISIBLE	OBSERVACIONES
TURBIEDAD	10 (Escala de Sílice)	DE NO CUMPLIRSE
COLOR	20 (Escala platino-Cobalto)	CON LOS RESULTADOS ANTERIORES,
SABOR	INSIPIDA	SE ADMITIRAN --
OLOR	INODORA	AQUELLOS QUE -- SEAN TOLERABLES PARA LOS USUARIOS.

CARACTERISTICAS QUIMICAS	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE EN ppm (EXCEPTO)
Nitrógeno amoniacal (N)	0.50
Nitrógeno proteico (N)	0.10
Nitrógeno de nitratos (N)	5.00
Potencial hidrogeno (pH)	8.00
Oxígeno consumido (O)	3.00
Sólidos totales disueltos (STD)	1000
Alcalinidad total (CaCO ₃)	400
Dureza total (CaCO ₃)	300
Cloruros (Cl)	250
Sulfatos (SO ₄)	250
Magnesio (Mg)	125
Zinc (Zn)	15
Cobre (Cu)	3
Fluoruros (Fl)	1.50
Hierro (Fe) y Mangneso (Mn)	0.30

continua.....

Arsénico (As)	0.05
Selenio (Se)	0.05
Cromo (Cr)	0.05
Compuestos fenólicos, (Fenol)	0.001

CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS	NÚMERO MÁXIMO PERMISIBLE
ORGANISMOS DE LOS GRUPOS COELI Y COLIFORMES COLONIAS BACTERIANAS POR CENTIMETRO CUBICO DE MUESTRA	20 200

Debido a la gran demanda de agua potable en el país y a la escases que presenta este líquido en muchas regiones, esta es ingerida sin cumplir con todos los requisitos anteriores.

El índice que en muchas regiones de México se encuentra sobrepasando el límite máximo permisible, es el de sólidos totales disueltos. Este, en ocasiones, es aceptado en cantidades mayores a 1,000 ppm., siendo su límite la tolerancia del consumidor. Generalmente no sobrepasa a las 2,000 ppm.

El ingerir agua con más de 1,000 ppm., normalmente no causa problemas a la salud siempre y cuando no se encuentren, en exceso, algunos elementos críticos como los que se mencionan a continuación:

Arsénico, Selenio y Cromo. - No es común encontrarlos en el agua, pero su presencia en cantidades pequeñas es tóxica, por lo cual el agua potable, no debe tener concentraciones mayores de 0.05 Ppm.

Zinc, Cobre, Hierro y Manganeso. - El cuerpo, puede llegar a tolerar, cantidades un poco mayores a las establecidas como requisito, no es común su presencia en el agua.

Sulfatos.- Concentraciones altas de este compuesto, actúan como laxante. En combinación con otros elementos, da lugar a un sabor desagradable.

Fluoruros.- El ingerir agua que contenga este elemento en exceso, produce el decaimiento de la dentadura, el cual dependerá de la concentración, la edad del consumidor, la cantidad de agua que se consume y la susceptibilidad de cada individuo.

Nitratos.- Proviene de la descomposición de materia orgánica. Concentraciones altas de este compuesto es causa de enfermedades hídricas mortales, como la metanoglobinemia en los niños.

La presencia de concentraciones relativamente altas de sodio, cloro, magnesio, calcio, carbonatos y bicarbonatos, no representan gran peligro, ya que pueden ser eliminadas por el organismo.

AGUA PARA RIEGO

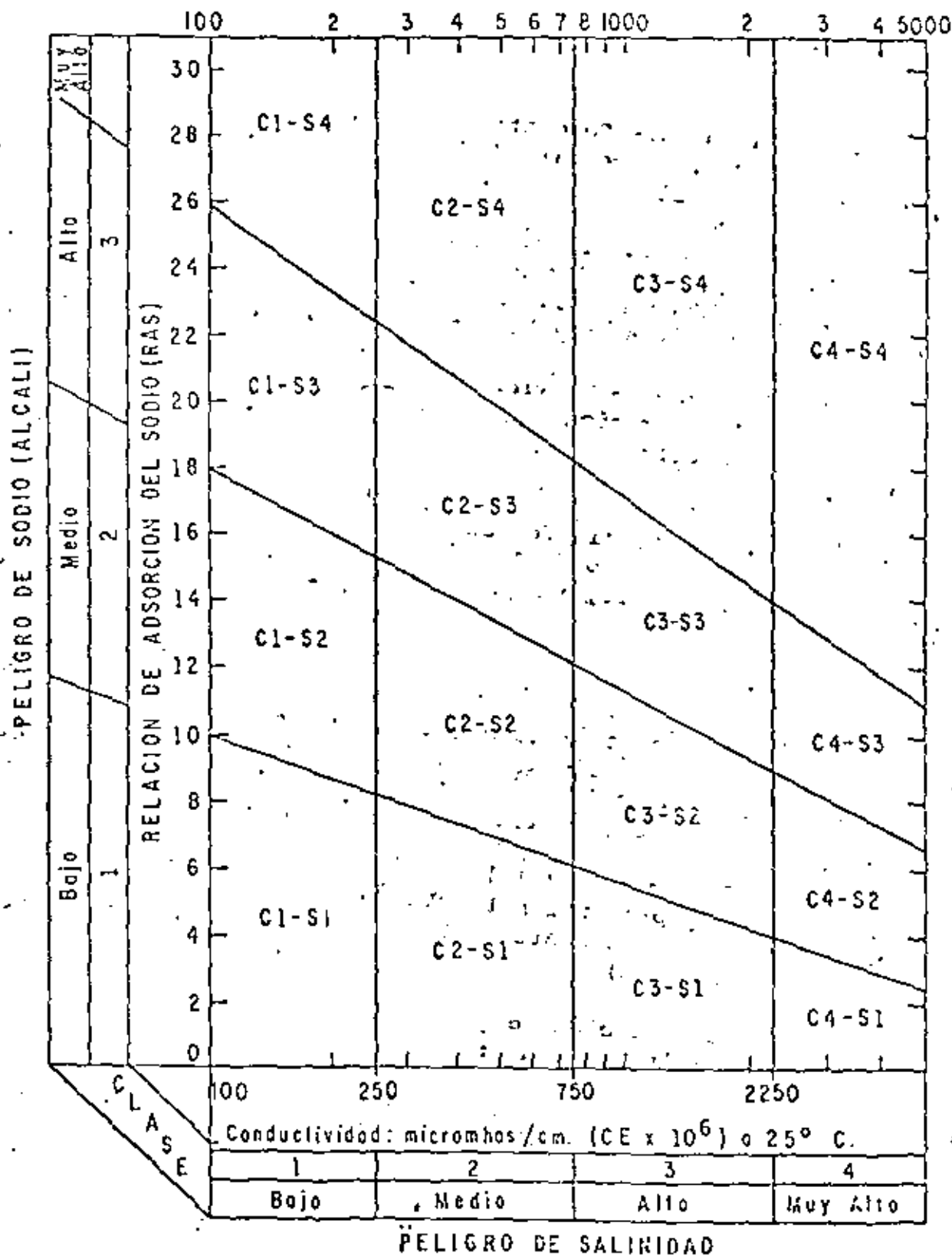
Para conocer la calidad del agua para riego, se ha optado por utilizar la clasificación de Wilcox (1948) en la cual, por medio de la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS), se obtiene la clase de agua para riego.

La conductividad eléctrica es igual al recíproco de la resistividad y proporcional a la concentración de sólidos totales disueltos. Normalmente, esta se expresa en micromhos por centímetro (mhos-cm).

La relación de adsorción de sodio, se obtiene por medio de la fórmula siguiente:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

CLASIFICACION DE AGUAS PARA RIEGO



Donde las concentraciones de Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} están dadas en equivalentes por litro. Con esta relación se obtiene el peligro que entraña el uso del agua para riego, el cual, como puede apreciarse en la fórmula, queda supeditado a las concentraciones absoluta y relativa de los principales cationes.

Los valores de CE y RAS, son graficados en el nomograma de clasificación (Fig. 1) obteniéndose de esta manera, la clase de agua para riego, la cual está definida por los parámetros, C y S y subíndices en cada uno de ellos.

El significado de las diferentes clases, así como algunas recomendaciones para el uso del agua en riego, se comentan a continuación:

- C1 BAJA SALINIDAD.- Puede usarse para riego en la mayoría de los suelos y para casi todas las plantas, con pocas probabilidades de que aumente la salinidad.
- C2 SALINIDAD MEDIA.- Puede usarse, si se hacen lavados moderados. Se pueden sembrar plantas moderadamente tolerantes a las sales en la mayoría de los casos, sin efectuar prácticas especiales para el control de la salinidad.
- C3 ALTAMENTE SALINA.- No puede usarse en suelos de drenaje deficiente. Aún con drenaje adecuado, se requiere un manejo especial para el control de la salinidad, además de seleccionar plantas que sean bastante tolerantes a las sales.
- C4 MUY ALTAMENTE SALINA.- No es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias aunque puede usarse, en ocasiones, bajo circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado; el agua para riego debe aplicarse en exceso con el fin de llevar a cabo un lavado fuerte. Las plantas que se seleccionen deberán ser muy tolerantes a las sales.
- S1 CON POCO SODIO.- Puede usarse para riego en casi todos los suelos, con poco peligro de que el sodio intercambiable llegue a niveles perjudiciales. Sin embargo, las plantas sensitivas al sodio como algunos frutales (fruto con hueso) y aguacate, pueden acumular concentraciones dañinas de sodio.

- S₂ CON CONTENIDO MEDIO.- Será peligrosa en suelos de textura fina y en aquellos que contengan una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavados leves, a menos que haya yeso en el suelo. Esta agua puede usarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad.
- S₃ CON ALTO CONTENIDO.- Conducirá a niveles peligrosos de sodio-intercambiable en la mayoría de los suelos por lo cual se requerirá de un manejo especial, buen drenaje, lavados fuertes y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos no desarrollarán niveles perjudiciales de sodio intercambiable. Los mejoradores químicos deberán usarse, para el reemplazo de sodio-intercambiable, excepto en el caso de que no sea factible el uso de mejoradores en aguas de muy alta salinidad.
- S₄ CON MUY ALTO CONTENIDO.- Generalmente no es apropiada para el riego, excepto en casos de baja y quizá media salinidad, donde la solución del calcio del suelo o el empleo de yeso u otros mejoradores, hagan factible el uso de esta agua.

La conductividad eléctrica puede tomarse como un índice en la selección de cultivos, en la tabla siguiente se presenta la tolerancia relativa de los cultivos a las sales.

FRUTALES		
MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
Palma datiles	Granada Higuera Olivo Vid Melón	Peral Manzano Naranja Toronja Ciruela Almendro Chabacano Durazno Fresa Limonero Aguacate

HORTALIZAS

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
$CE_e \times 10^3 = 12^*$ Betabel Bretón o col rosada Espárragos Espinacas $CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_e \times 10^3 = 10$ Jitomate Brócoli Col Chile dulce Coliflor Lechuga Maíz dulce Papas Zanahoria Cebolla Chicharos Calabaza Pepinos $CE_e \times 10^3 = 4$	$CE_e \times 10^3 = 4$ Rábano Apio Ejotes $CE_e \times 10^3 = 3$

PLANTAS FORRAJERAS

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
$CE_e \times 10^3 = 18$ Zacate alcalino de coquito Zacate Bermuda Zacate Rhodes	$CE_e \times 10^3 = 12$ Trébol blanco Trébol amarillo Zacate inglés perenne Zacate Sudán Trébol Huban Alfalfa (California común)	$CE_e \times 10^3 = 4$ Trébol blanco holandés Trébol Alsike Trébol rojo Trébol ladino Pinpinela

continúa.....

Cebada (para heno
Trifolium (pata de
pájaro)

$$CE_e \times 10^3 = 12$$

Trigo (para heno)
Avena (para heno)
Gramma azul
Bromo suave
Veza lechosa Cicer

$$CE_e \times 10^3 = 4$$

$$CE_e \times 10^3 = 2$$

CULTIVOS COMUNES

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
$CE_e \times 10^3 = 12$	$CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_e \times 10^3 = 4$
Cebada (grano) Remolacha azucarera Colza Algodón	Centeno (grano) Trigo (grano) Avena (grano) Arroz Sorgo (grano) Maíz Linaza Girasol Higuerilla	Alubias
$CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_e \times 10^3 = 6$	
	(De: Suelos Salinos y Sódicos, 1954)	

*.- El número que sigue a la $CE_e \times 10^3$ es el valor de la conductividad eléctrica del extracto de saturación en milimhos por centimetro a 25°C asociado a una disminución en los rendimientos de 50 por ciento.

AGUA PARA ABREVADERO. -

El agua usada en granjas y ranchos ganaderos, normalmente debe de cumplir con los mismos requisitos que el agua potable, ya que se utilizada también para usos domésticos de los ranchos. Los animales pueden ingerir agua con una mayor concentración de sales.

A continuación se describen los límites máximos para algunos animales, según Mckee y Wolf, (1963).

Aves	2,860 ppm
Cerdos	4,290 ppm
Caballos	6,430 ppm
Ganado Lechero	7,150 ppm
Ganado de Carne	10,100 ppm
Borrego	12,900 ppm

AGUA PARA LA INDUSTRIA. -

La clase de agua requerida en la industria, depende del tipo de instalaciones utilizadas.

Una forma rápida de catalogar el tipo de agua para la industria, es conociendo su dureza. Esta normalmente se reporta en concentración de carbonato de calcio (Ca CO_3).

Cuando un agua contiene concentraciones bajas de este compuesto, se denomina "agua blanca" y al agua con concentraciones altas, "agua dura".

De acuerdo con algunos autores (Durfor y Becker, 1964), se han distinguido los siguientes rangos de dureza.

Concentración en mg/l de CaCO_3	Descripción
0 - 60	Agua blanca.
61 - 120	Agua moderadamente dura.
121 - 180	Agua dura.
más de 180	Agua muy dura.

En la tabla siguiente, se muestran algunos de los límites para la industria textil y papelera, así como en derivados del petróleo y embotelladoras.

CALIDAD DEL AGUA PARA ALGUNAS INDUSTRIAS (En mg/l)				
CONSTITUYENTE	INDUSTRIA TEXTIL	INDUSTRIA PAPELERA	DERIVADOS DEL PETRO LEO	EMBOTE- LLADORAS
SiO ₂		50		
Fe	0.1	1.0	1.0	0.3
Mn	0.1	0.5		0.05
Ca		20	75	
Mg		12	30	
Cu	0.01			
NH ₄				
Zn				
HCO ₃				
SO ₄				500
Cl		200	300	500
F				
NO ₃				
DUREZA	25	100	350	
pH	2.5-10.5	6-10	6-9	
S.T.D.	100		100	

(En: John Hem, 1970)

CONSTITUYENTE
O PROPIEDAD -
FÍSICA.

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.

SIGNIFICADO.

Color

En agua superficial, componentes orgánicos provenientes del decaimiento de la vegetación y por contaminación de desperdicios orgánicos e inorgánicos - descargados a los ríos. En agua subterránea, componentes orgánicos que han pasado a través de lignita y turba.

Indica la presencia de los orgánicos o materia orgánica en el agua subterránea. Es un factor importante en la valuación de agua potable para otros usos.

Cloruro
(Cl)

Proviene de la disolución de rocas y suelos, en especial evaporitas; se presenta por contaminación de desperdicios y desagües. Antiguas salmueras, agua de mar y salmueras industriales, contienen grandes cantidades de este elemento.

Grandes concentraciones de este elemento, aumenta el poder corrosivo del agua y, combinación con sodio, da sabor salado.

Concentración
de Hidrógeno
(pH)

Los ácidos y el bióxido de carbono libre, bajan el valor del pH. Carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, fosfatos, silicatos y boratos, aumentan el valor del pH.

Un pH igual a 7.0 indica neutralidad en una solución. Valores mayores indican alcalinidad y menores, acidez. La corrosividad, generalmente aumenta al disminuir el pH. Aguas excesivamente calinas, pueden atacar metales.

Conductividad
Eléctrica.

Depende de la cantidad de sales disueltas en el agua.

Es una medida de la capacidad del agua de conducir corriente eléctrica. Varía con la concentración y grado de ionización de los constituyentes, así como con la temperatura. Se usa para determinar la cantidad de sales disueltas en el agua.

SIGNIFICADO DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS QUIMICAS DEL AGUA.

TITUYENTE
 OPIEDAD -
 CA.

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.

SIGNIFICADO.

Carbonato
 3)
 Carbonato
 3)

Proviene de la incorporación del bióxido de carbono en el agua y de la disolución de rocas carbonatadas, como la caliza y la dolomita.

Los carbonatos y bicarbonatos producen alcalinidad. Los carbonatos de calcio y magnesio se descomponen en calizas y aguas calientes, facilitando la incrustación y liberando bióxido de carbono corrosivo a la atmósfera. En combinación con calcio y magnesio es causa de la dureza.

o

Proviene de la disolución de suelos y rocas, en especial las de origen ígneo. El agua de zonas térmicas y especialmente aquéllas que se encuentran en áreas de actividad volcánica reciente, pueden contener altas concentraciones de boro. Puede deberse en ocasiones, a contaminación por desperdicios, especialmente donde se usan detergentes que contienen boratos.

Cantidades pequeñas de este elemento, es esencial para el crecimiento y nutrición de las plantas, pero es tóxico para la mayor parte de ellas cuando se encuentra en concentraciones mayores de 1 mg/l.

Calcio
 Ca)

Proviene de casi todo tipo de suelos y rocas pero en especial de las calizas, las dolomitas y el yeso. Algunas salmueras contienen grandes cantidades de calcio.

El calcio y el magnesio son los principales responsables de la dureza en el agua, la cual origina un gran consumo de jabones. Puede incrustar tuberías y además, reducir su eficiencia.

CONSTITUYENTE CANTIDAD - P.P.M.	FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.	SIGNIFICADO.
Dureza como CaCO_3	En la mayoría de los casos, la dureza es debida a el calcio y el magnesio.	Consumo jabón y no produce espuma. Forma depósitos de jabón en baños. El agua dura incrusta calderas y tuberías. Dureza es equivalente de dureza de carbonatos y bicarbonatos.
Estroncio (Sr)	Proviene de la disolución de rocas y suelos, en especial de rocas carbonatadas y rocas de origen ígneo.	Las concentraciones son en general muy bajas.
Hierro (Fe)	Proviene de la disolución de suelos, rocas y de tuberías, bombas y equipos similares. Concentraciones mayores a 1 ó 2 ppm, generalmente indican drenaje de zonas mineras u otra fuente.	Expuesto a la superficie, fierro disuelto en el agua oxida formando un sedimento rojizo. Más de 0.3 ppm, mancha lavadoras y utensilios. Elemento nocivo en el proceso de bebidas, tintes, blanqueadores, hielo, etc. Grandes concentraciones, producen sabor desagradable y favorecen el crecimiento de bacterias.
Flúor (F)	Se encuentra diseminado en cantidades muy pequeñas, en casi todo tipo de rocas y suelos.	Reduce la picadura de dientes (caries) en los niños durante la época de calcificación. Excesos de este elemento, produce el decaimiento de la dentadura, el cual dependerá de la concentración de flúor, la edad del consumidor, la cantidad de agua que se consume y la susceptibilidad de cada individuo.

CONSTITUYENTE
PROPIEDAD
FÍSICA

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.

SIGNIFICADO.

Calcio
(4)

Proviene del intemperismo de rocas ígneas y de la lixiviación de suelos que contienen desperdicios orgánicos, fertilizantes, detergentes y drenajes domésticos e industriales.

Concentraciones mayores a las normales, indican contaminación por desechos.

Litio
(5)

Proviene de la disolución de rocas durante el intemperismo. La escasez del litio es probablemente el responsable de las relativas bajas concentraciones en el agua.

Las concentraciones de este elemento en el agua son en general muy bajas, no afectando la calidad para los diferentes usos.

Magnesio
(6)

Proviene de la disolución de la mayoría de los suelos y rocas pero especialmente de las dolomitas. Algunas salmueras contienen cantidades abundantes de magnesio.

El magnesio y el calcio, son los principales responsables de la dureza y del agua incrustante.

Manganeso
(Mn)

Proviene de la disolución de algunos suelos y rocas. Es menos común que el hierro, pero normalmente se encuentra asociado con éste y con aguas ácidas.

Es el causante de la coloración café oscura o negra.

Nitrógeno

Amonio NH_3
Nitrito NO_2
Nitrate NO_3

Se encuentra en el agua como NH_3 , NO_2 y NO_3 , dependiendo del grado de oxidación. Proviene de la disolución de rocas ígneas, suelos enriquecidos por legumbres y fertilizantes, establos, y aguas de drenaje.

Concentraciones altas de nitrógeno, indica contaminación. Los nitratos aumentan el crecimiento de algas y otros organismos que producen olor y sabor desagradable. Concentraciones mayores a 45 ppm nitratos, causan metemoglobinemia en los niños.

ESTADO FUENTE
PROPIEDAD -
RICA.

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.

SIGNIFICADO.

Clasificación de sodio (RAS)	Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos.- Se encuentra también en salmueras, agua de mar y en algunos desechos industriales.	Grandes concentraciones, en combinación con cloro, producen un sabor salado. Es esencial en la nutrición de las plantas.
---------------------------------	--	--

Clasificación de sodio (RAS)	Se calcula usando las concentraciones de los iones que se indican en miliequivalentes por litro	El RAS es usado junto con la conductividad eléctrica, para determinar la calidad del agua para riego.
---------------------------------	---	---

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

Selenio (Se)	La principal fuente de selenio son las emanaciones volcánicas y los depósitos de sulfuros que han sido acumulados por erosión e intemperismo. Se encuentra en rocas cretácicas, en especial en lutitas y suelos derivados de ellas.	Es tóxico en cantidades pequeñas. Constituye un problema cuando se encuentra en plantas o agua para el ganado.
--------------	---	--

Silicio (SiO ₂)	Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. Generalmente se presenta en concentraciones bajas de 1 a 30 ppm. Concentraciones hasta de 100 ppm suelen encontrarse en aguas altamente alcalinas.	Produce incrustación en tuberías y calderas.
-----------------------------	---	--

CONSTITUYENTE
PROPIEDAD
FÍSICA.

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.

SIGNIFICADO.

cloruro a)	Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. Se encuentra también en salmueras, agua de mar, desechos industriales y drenajes.	Grandes concentraciones en combinación con el cloro, producen un sabor salado. Cantidades fuertes comúnmente limita el uso del agua para la agricultura.
---------------	--	--

Sólidos disueltos	Proviene de la disolución de minerales que forman los suelos y las rocas. Puede incluir constituyentes orgánicos y agua de cristalización.	El valor de los sólidos disueltos, es una medida de todas las concentraciones que se encuentran en el agua. Es un índice importante en la determinación de los usos del agua.
----------------------	--	---

Sulfatos (SO ₄)	Proviene de la disolución de rocas y suelos que contienen yesos, fierro y compuestos sulfurados. Comúnmente se presenta en aguas de drenaje de minas y en algunos desechos industriales.	Concentraciones altas, actúan como laxante y en combinación con otros iones al agua un sabor desagradable. En agua que contiene calcio, produce incrustación.
--------------------------------	--	---

EL USO Y LA APLICACION DE
TRAZADORES DE AGUA SUBTERRANEA

P O R
ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

C O N T E N I D O

- RESUMEN
- INTRODUCCION
- FLUORICEINAS
 - URANINA
 - EOSINA
 - AMINORHODAMINA G EXTRA
 - RHODAMINA F B
- EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE FLUORICEINA
- SALES
- EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE SALES
- ESPORAS
- ISOTOPOS
 - DEUTERIO Y OXIGENO 18
 - TRITIO
 - CARBONO 14
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS

EL USO Y LA APLICACION DE TRAZADORES
DE AGUA SUBTERRANEA

Por: Ing. Juan Manuel Lesser Illades. *

RESUMEN

La técnica sobre la aplicación de trazadores en agua subterránea, se ha venido desarrollando con nuevas metodologías en los últimos 25 años. Los principales trazadores utilizados son fluoriceinas, sales, esporas e isótopos. Las fluoriceinas son uno de los trazadores más económicos y fáciles de utilizar. Su aplicación se ha incrementado al introducir en el proceso de -- detección, el espectrofluorómetro y la concentración por medio -- de carbón activado. Las esporas, son el trazador más nuevo que existe, el cual ha probado ser de gran utilidad. Otro tipo de trazadores de agua subterránea, son los isótopos deuterio, oxígeno 18, tritio y carbono 14, cuya técnica y aplicación es cada -- día mayor.

* Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas. - S.A.R.H.

I N T R O D U C C I O N .

En determinadas ocasiones es de esencial importancia el conocer con exactitud si existe conexión entre dos puntos de un acuífero. Para ello se han llevado a cabo, desde el siglo pasado, experimentos consistentes en mezclar, en el agua de un aprovechamiento subterráneo localizado aguas arriba, una sal o un tinte, el cual puede ser reconocido en otro aprovechamiento localizado a cierta distancia aguas abajo, determinando así, la posible conexión entre dichos puntos. A esta técnica se le conoce como trazadores de agua subterránea.

Este método, se ha aplicado principalmente en rocas fracturadas, donde el tiempo de tránsito es corto, y en distancias hasta de 40 km (Zotl, 1970). En menor proporción, se ha llevado a cabo en medios granulares, ya que por una parte la velocidad de flujo es relativamente pequeña y por otra, la arcilla produce absorción e intercambio iónico, por lo cual la aplicación en este medio debe ser en distancias cortas.

Los puntos de inyección más comunes, son ríos subterráneos localizados dentro de cavernas y los principales puntos de muestreo son manantiales. Con algunas limitaciones los puntos de inyección y muestreo de trazadores pueden ser también pozos, norias,

galerías filtrantes, drenes, lagos y presas.

En algunas ocasiones, se ha utilizado esta técnica para determinar si el agua de manantiales, ríos o drenes, corresponden a filtraciones de una presa o lago.

Un buen trazador, debe reunir las características siguientes: Debe ser no tóxico; soluble en agua, identificable en pequeñas concentraciones; resistente a cambios químicos; tener poca o nula capacidad de intercambio iónico; no ser absorbido o retenido por suelo o rocas; su determinación debe ser mediante análisis sencillos y su aplicación económica.

Los principales trazadores son fluoriceínas, sales espumas e isótopos.

FLUORICEINAS

Son sustancias que tienen la propiedad de emitir luz fluorescente. La longitud de onda de esta luz, varía de una sustancia a otra, propiedad que se utiliza para identificarlas. Las sustancias más comunes utilizadas como trazadores son: Uranina, Eosina, Amidorhodamina G extra, Rhodamina FB y Tinopal CBS-X. A continuación se describen las características de cada una de estas sustancias.

URANINA.- Es la de mayor aplicación. Consiste en una fluoriceína de sodio que presenta un color naranja en soluciones concentra

das (mas de 1 ppm), que cambia a verde-amarillento al ser diluida. La intensidad de fluorescencia depende del pH. En la figura 1, se muestra la relación entre el pH y la intensidad de fluorescencia de la uranina. En aguas muy ácidas, pierde su fluorescencia pero este proceso es reversible, pudiendo recobrarla al añadir un compuesto básico, como KOH ó NH₃. Esta propiedad puede utilizarse para identificar el trazador.

El poder de la uranina, puede disminuir por medio de procesos fotoquímicos como la luz ultravioleta, por agentes oxidantes como el cloro y el ozono y en algunos casos por procesos biológicos.

Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm. Antiguamente se utilizaban lámparas de luz ultravioleta para identificarla cuando se encontraba en concentraciones bajas. Actualmente las concentraciones entre 1×10^{-2} y 2×10^{-6} ppm son medidas con espectrofluorómetro.

La intensidad máxima de fluorescencia se detecta a una longitud de onda de 515×10^{-9} m. A mayor o menor longitud de onda la intensidad disminuye en forma simétrica (figura 2) y la forma de la curva distingue a la uranina de otra fluorocina. Para concentraciones menores a 2×10^{-6} ppm, se utiliza carbón activado (W.B. WHITE, 1967, F. BAVER, 1972) el cual se coloca en el agua durante un tiempo que varía de un día a semanas, donde la uranina es absorbida y concentrada de 50 a 500 veces por el car-

bón y su concentración medida posteriormente.

Para extraer la uranina del carbón, se le agrega a éste - algunas gotas de una de las siguientes preparaciones:

- a) Una parte de alcohol etílico al 95% y una parte de hidróxido de potasio diluido al 15% en agua destilada.
- b) Ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF), dos partes de agua destilada y una gota de NH_3 .

Por último, la uranina es resistente a la absorción por arcillas y su uso no es tóxico para el hombre o animales.

EOSINA. - Presenta una fluorescencia naranja-rosa, cuya máxima intensidad se detecta a una longitud de onda de 535×10^{-9} m.

Cuando se presentan valores mayores de 0.01 ppm, es visible al ojo humano. Entre 0.01 y 50×10^{-6} ppm, puede detectarse con espectrofluorómetro. Concentraciones menores se concentran con carbón activado del cual puede extraerse añadiendo una sustancia compuesta por ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

Al utilizarse junto con rhodamina FB o uranina, se producen interferencias por lo que su aplicación conjunta es limitada.

AMINORHODAMINA G EXTRA. - Conocida anteriormente como sulforhoda

mina G extra, presenta una fluorescencia naranja-rosa en soluciones concentradas, que cambia a verde al ser diluida. Su mayor intensidad se presenta a una longitud de onda de 554×10^{-9} m. Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm y con espectrofluorómetro pueden detectarse hasta 6×10^{-3} ppm. Valores menores pueden concentrarse por medio de carbón activado, del cual puede ser extraída la fluoriceína, por medio de una solución de ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

Esta fluoriceína presenta inconvenientes, ya que es difícil de disolver y fácilmente absorbida por arcillas. En presencia de uranina, rhodamina FB o eosina, se producen interferencias.

RHODAMINA FB. Presenta un color púrpura y fluorescencia roja. Su mayor intensidad se detecta a una longitud de onda de 578×10^{-9} m. Es visible al ojo humano en concentraciones mayores de 0.01 ppm. Con espectrofluorómetro se detectan hasta 10×10^{-3} ppm. Valores menores pueden ser concentrados por medio de carbón activado del cual se extrae por medio de una de las soluciones siguientes:

- a) Cinco partes de propánol y 5 partes de hidróxido de amonio.
- b) Ocho partes de N-N dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

La rhodamina FB, presenta interferencias al combinarse

con uranina, eosina o aminorhodamina-G extra. Es tóxica cuando se inhala en soluciones concentradas. Por otra parte, en presencia de arcillas es altamente absorbida.

TINOPAL CBS-X.- Presenta un color verde con fluorescencia azul. Su mayor intensidad se determina a una longitud de onda de 430×10^{-9} m. Es visible solamente en concentraciones mayores de 1 ppm. Con espectrofluorómetro se pueden detectar hasta 440×10^{-3} ppm. Valores menores son concentrados por medio de carbón activado del cual la fluoriceína puede extraerse agregando unas gotas de una solución que contenga ocho partes de N-N dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada. Este producto, es absorbido por arcillas.

EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE FLUORICEINA

Con el propósito de ilustrar su aplicación, a continuación se presentan los resultados obtenidos en un experimento llevado a cabo en una región cárstica.

Se propuso conocer la conexión entre el agua de un río que se infiltraba dentro de una dolina y dos manantiales situados a 5 kilómetros de la primera. Para ello, se inyectaron 3 kg de uranina en el agua de la dolina y se obtuvieron muestras de agua cada dos horas en los manantiales "H" y "S".

En el manantial "S", no se detectó uranina, por lo que --

se concluye que este no tiene conexión con la zona de recarga donde se inyectó el trazador.

En el manantial "H", se empezó a detectar uranina 56 horas después de la inyección, y la concentración del trazador fue aumentando hasta llegar a 32 mg/m^3 , según muestra en la figura 3.

Tomando en cuenta el tiempo requerido por el trazador para circular entre los puntos de inyección y muestreo, y la distancia entre ellos, se obtuvo la velocidad mínima de circulación, la cual fue de 3.7 km/día .

Otro ejemplo ilustrativo de la aplicación de trazadores, ahora en acuíferos granulares someros es el siguiente:

En un valle aluvial que presenta un acuífero freático a 3 m de profundidad, se perforaron 9 pozos a 3" de diámetro y 5 m de profundidad, distribuidos en la forma como se ilustra en la figura No. 4.

En el pozo central, se inyectó uranina y se obtuvieron muestras de agua en el resto de los pozos, cada 20 minutos.

Después de 3 horas 20 minutos de la inyección, se detectó uranina solamente en los pozos 4 y 5, de donde se puede obtener que el agua subterránea fluye en dirección sureste, a una velocidad de 1.5 m/hr .

Este método es utilizado en zonas sin información y su aplicación queda limitada por la profundidad a que se encuentre el nivel estático, ya que mientras mayor es ésta, mayor es el costo de los pozos de muestreo e inyección.

S A L E S

Las sales son el trazador artificial de agua subterránea más antiguo que se conoce se haya aplicado con éxito. Los productos utilizados más comunes son, sal de cloruro de sodio y sal de cloruro de potasio.

La sal es disuelta en agua y posteriormente incorporada al acuífero. Una de las desventajas que presenta este método, es que requiere que en la zona de inyección el caudal de agua que entre el acuífero sea grande. Por otra parte se necesita una gran cantidad de sales en cada experimento.

En zonas cársticas, para distancias entre 3 y 5 km se requiere inyectar un mínimo de 500 kg de sal (Zotl, 1975). La cantidad más grande que se ha llegado a inyectar en un experimento de trazadores, fue de 50 toneladas de NaCl, (W. Kass, en H. Batsche et. al., 1970), donde después de 4 días, se encontró en uno de los manantiales de observación un incremento de cloruros de solo 39 ppm.

Los grandes volúmenes de trazador requeridos mediante es

te método, hacen que su uso sea limitado. La ventaja consiste en que pueden efectuarse determinaciones cuantitativas.

EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE SALES

Durante los trabajos realizados para conocer la posible conexión entre el agua de un río que se infiltraba en una dolina y dos manantiales localizados a 5 kilómetros de ésta, como se mencionó en párrafos anteriores, se inyectaron 500 kg de cloruro de sodio y 400 kg de cloruro de potasio.

Posteriormente se obtuvieron muestras de agua con intervalos de dos horas cada una, tanto en el manantial "H" como en el "S", las cuales se analizaron químicamente determinándose el contenido de cloruros, sodio y potasio.

Al igual que en los resultados obtenidos para la fluoriceína (párrafos anteriores), en el manantial "S", no se detectó incremento alguno en su contenido salino, por lo cual se concluyó que este manantial no tiene conexión con el agua de infiltración de la dolina.

Por lo que se refiere al manantial "H", los resultados de los análisis se graficaron en la figura 5, donde se observa que 56 horas después de la inyección de las sales, se detectó un incremento en los iones determinados, ratificando la comunicación entre la dolina y el manantial.

Considerando el tiempo que tardó en aparecer el trazador en el manantial y la distancia entre éste y la dolina, se obtuvo la velocidad de flujo del agua de este acuífero.

Por otra parte, con estos resultados y los de los análisis químicos y volúmenes aforados, es factible determinar el volumen mínimo de agua almacenado, así como el conocer en que proporción el agua del manantial, proviene de la que se infiltra en la dolina.

E S P O R A S

Las esporas utilizadas como trazadores corresponden al tipo *Lycopodium Clavatum*. Tienen un diámetro de 30-55 micras y un color amarillo pálido (1 micra = 10^{-4} cm).

Su forma es similar a la de un triángulo isósceles con la dos convexos. Sus orillas forman cadenas de semicírculos cóncavos (figura 6). Están cubiertas por una fina membrana insoluble por lo que al ser incorporadas al agua son transportadas en suspensión. No se sedimentan y tienen la propiedad de no ser absorbidas o intercambiadas con el suelo o rocas.

En el año de 1953, A. Mayr, trató de emplear las esporas como trazador debido a las propiedades que presentan pero su identificación resultó problemática. J. Zotl y V. Maurin, idearon teñir las esporas de diferentes colores para facilitar su

identificación lo cual resultó exitoso. De esta manera pueden mezclarse en agua, esporas de diferentes colores y posteriormente detectarse en cierta zona de muestreo identificándose, por el color, con cuales sitios tiene conexión.

El muestreo de esporas se lleva a cabo instalando redes para plancton las cuales se pueden dejar por tiempo indefinido en el lugar de muestreo. Al preparar la muestra para observarla en el microscopio, se ha visto que se obtienen resultados satisfactorios, si se lleva a cabo lo siguiente:

A las muestras de campo se le agregan 3 gotas de hidróxido de potasio al 10%, 3 gotas de formol al 35% y una pisco de urea; posteriormente se calienta en baño de María por tres minutos. Se centrifuga y el sedimento se concentra en un tubo al que se le agrega una gota de ácido etílico. Se coloca una pequeña parte de la preparación en una lámina delgada para su análisis al microscopio.

I S O T O P O S

Los principales isótopos utilizados como trazadores en agua subterránea, se dividen en estables (Deuterio y Oxígeno 18) y radioactivos (Tritio y Carbono 14). A continuación se describen sus principales características.

DEUTERIO Y OXIGENO 18. - Son identificados con las siglas D y ¹⁸O. Se encuentran en el agua de mar en promedio de 320 y

2 000 ppm respectivamente. Sus concentraciones son representadas mediante las relaciones D/H y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y expresadas en unidades δ como sigue:

$$\delta D = \frac{(D/H)_{\text{MUESTRA}} - (D/H)_{\text{SMOW}}^*}{(D/H)_{\text{SMOW}}} \times 1000$$

La evaporación produce un fraccionamiento isotópico y en el agua de lluvia de zonas con climas moderados es lineal y en la proporción siguiente:

$$\delta D = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

El fraccionamiento isotópico, está en relación con la temperatura y altitud.

Tomando en cuenta los procesos y propiedades de estos isótopos, es posible diferenciar agua superficial sujeta a evaporación, de agua de lluvia, o de agua infiltrada a diferentes alturas.

TRITIO.- Tiene una vida media de 12.26 años. Antes del año de 1953, cuando se efectuaron las primeras pruebas con bombas atómicas, el agua de lluvia, contenía entre 5 y 10 unidades de tritio (U.T.). Como resultado de dichas explosiones, el contenido de tritio en la atmósfera se incrementó llegando a medirse hasta 800 U.T. en algunos lugares. La concentración de este isótopo en el agua, varía con la latitud y los cambios estacionales.

* Standard Mean Ocean Water.

Tomando en cuenta lo anterior se puede decir que el agua con contenidos bajos de tritio, menores de 1 U.T. corresponde a agua infiltrada hace más de 50 años. Si tiene concentraciones entre 10 y 20 U.T. indica que el agua es de lluvia o reciente infiltración y si tiene más de 20 U.T. corresponde a agua con entre 10 y 50 años de infiltrada.

CARBONO 14. - Este isótopo junto con los mencionados anteriormente, son los de mayor aplicación de hidrología y tiene una vida media de 5730 años. El carbono 14 contenido en el agua, empieza a desintegrarse al incorporarse al acuífero, por lo cual al medir su contenido en algún punto, es posible determinar el tiempo que ha permanecido en el acuífero. Pueden detectarse edades hasta de 30,000 años.

La edad del agua por medio del carbono 14, se complementa con la del tritio, debido a los diferentes rangos que abarcan. Cuando la concentración de tritio es menor de 2 U.T. o sea infiltrada antes de 1954, se dice que es negativa y para valores mayores, o sea posteriores a 1954 se dice que es positiva. Respecto al carbono 14, si se detecta alguna concentración, significa que el agua tiene menos de 30,000 años y se dice ser positiva, pero si no se detecta entonces tiene más de 30,000 años y es negativa.

Combinando a estos isótopos, tenemos que si ambos son positivos el agua es posterior a 1954; si son negativos es que tie

no más de 30,000 años y si el tritio es negativo y el carbono 14 positivo, el agua se infiltró entre 1954 y hace 20,000 años.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los trazadores de agua subterránea más comunes son: fluoriceinas, sales, esporas e isótopos.

Este método es de mayor aplicación, en rocas fracturadas, donde el tiempo de tránsito es corto. En medios granulares, ya que por una parte la velocidad de flujo es relativamente pequeña y por otra, la arcilla producen absorción e intercambio iónico, se utiliza para distancias cortas.

Dentro de las fluoriceinas, la que ha reportado mejores resultados es la uranina. Su utilización permite determinar, principalmente, la conexión entre dos puntos de un acuífero pero es también posible, conocer velocidades y direcciones del flujo de agua subterránea.

El uso de sales es restringido debido a la gran cantidad de trazador que se necesita utilizar en cada experimento. Es recomendable para distancias cortas.

Las esporas son el trazador más nuevo que se haya aplicado con éxito. Su manejo es sencillo, económico y puede utilizarse para distancias hasta de 40 kilómetros.

Por las características que presentan el deuterio y el oxígeno 18, es factible a partir de su determinación, diferenciar aguas superficiales sujetas a evaporación, de agua de lluvia, de agua infiltrada a diferentes alturas.

Los isótopos tritio y carbono 14, son utilizados para datar el agua, abarcando un rango de prácticamente cero a 30,000 años.

REFERENCIAS

- Back W. and J. Zotl., 1975, "Application of Geochemical Principles, Isotopic Methodology and Artificial Tracers to Karst Hydrology" In: Hydrogeology of Karstic Terrains, I.A.H.
- Dansgaard W., 1964, "Stable Isotopes in Hydrology" Tellus 16, 436-468.
- Dechant, M., 1967 "Die Färbung der Lycopodiumspores" Steir Beitr. Z. Hydrogeologie, 18/19, 241-247.
- Dechant M., 1977, "The Dyeing of Lycopodium-Spores" Notes of The Ground Water Tracing Techniques Course" Graz, Austria.
- Gonfiantini, R., 1971 "Notes on Isotope Hydrology" International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria.
- Institute for Karstresearch SAZU. "Underground" Yugoslavia.
- Payne R.B., 1975, "Isotope Hydrology" International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- White, W.B., 1967, "Modifications of Fluorescein Dye Ground-water Tracing Techniques". Steir. Beitr. Z. Hydrogeologie, 18/19 151-158.

Wittwen R., Waser H. and Matthe, B., 1971, "Essai de Fixation -
de la Sulforhodamine B et de la Sulforhodamine G. -
Extra sur Charbon Actif".
Act. 4e Congr. Suisse Speicol. Neuchatel 1971, 78-83.

Zotl J. G., 1965, "Carst Hydrological investigations for the Cons-
truction of the Diessbach Reservoir".

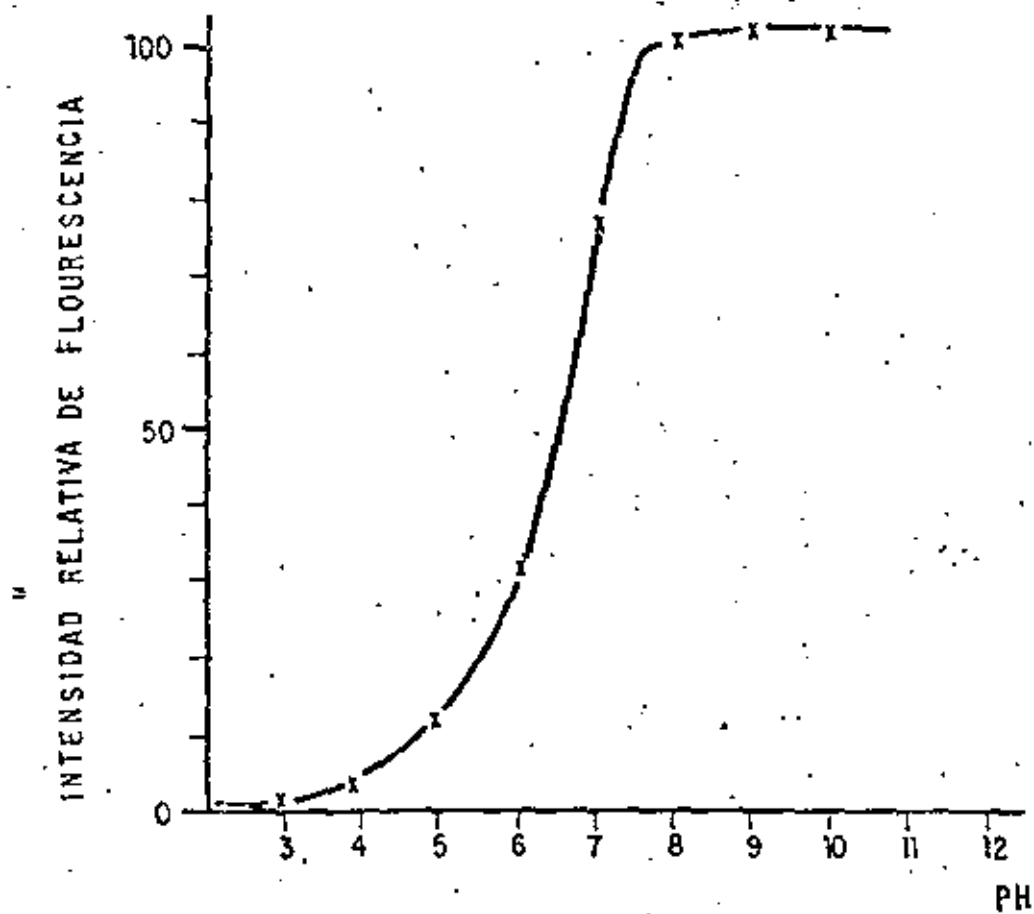


FIGURA 1

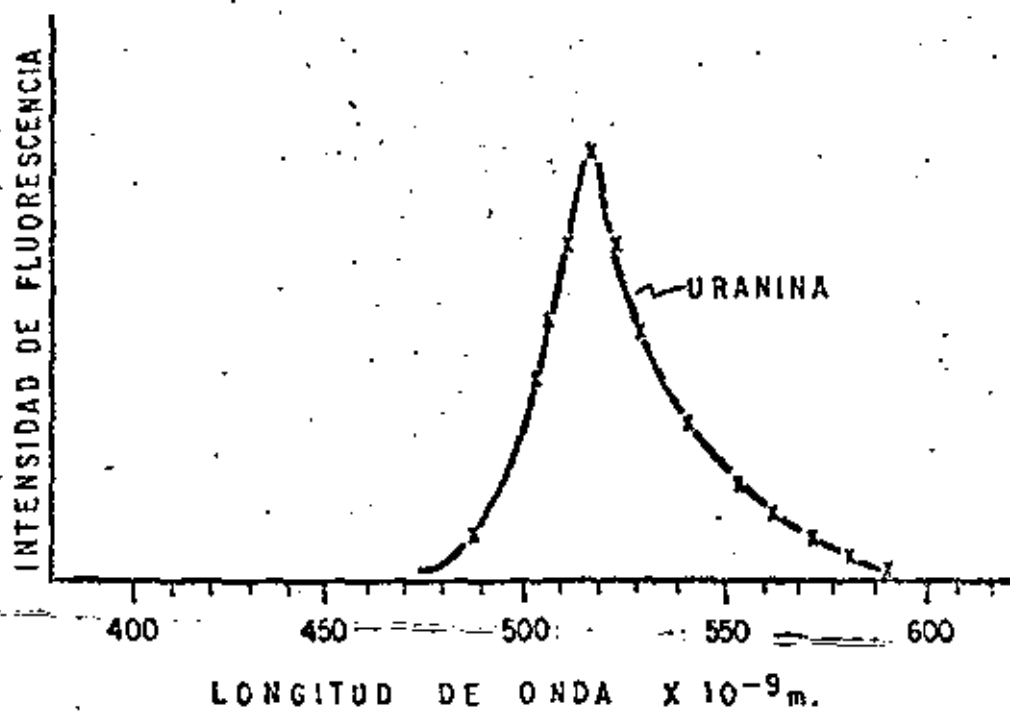


FIGURA 2

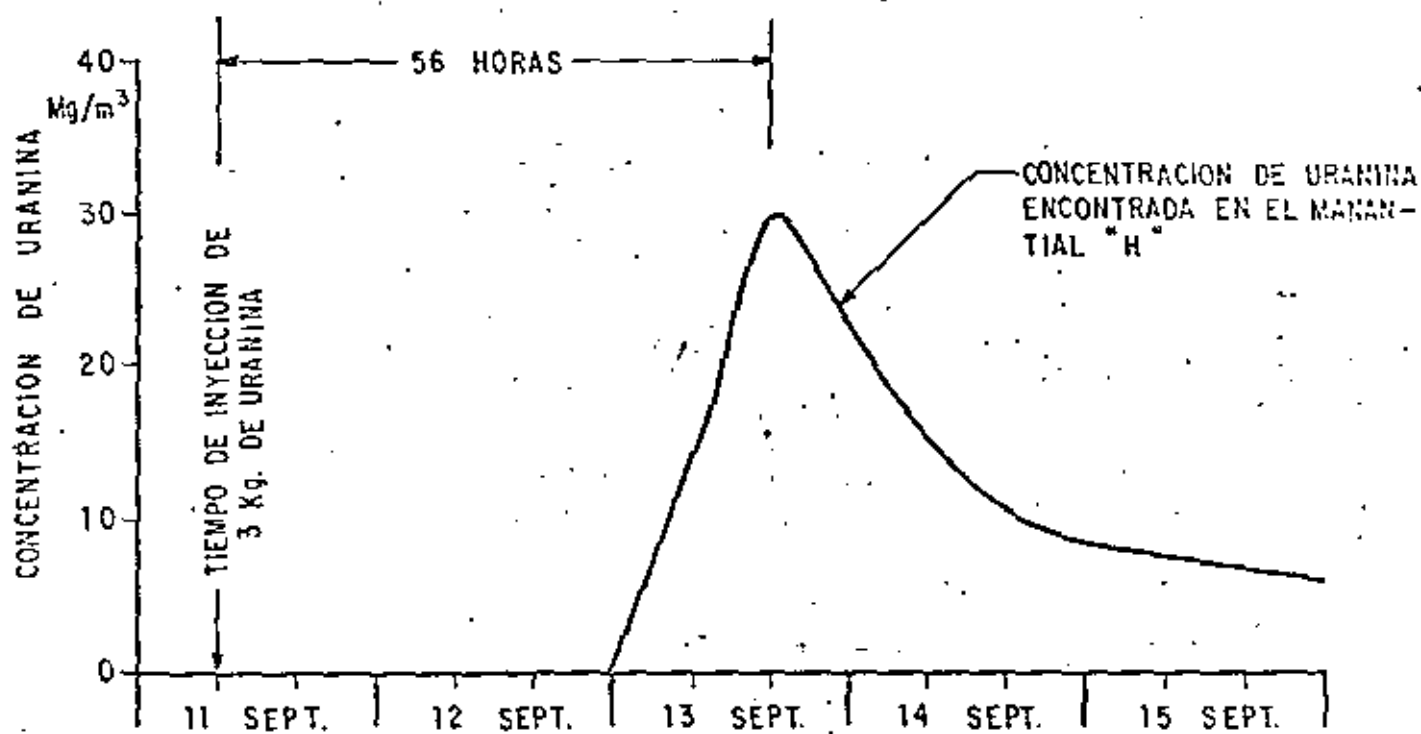
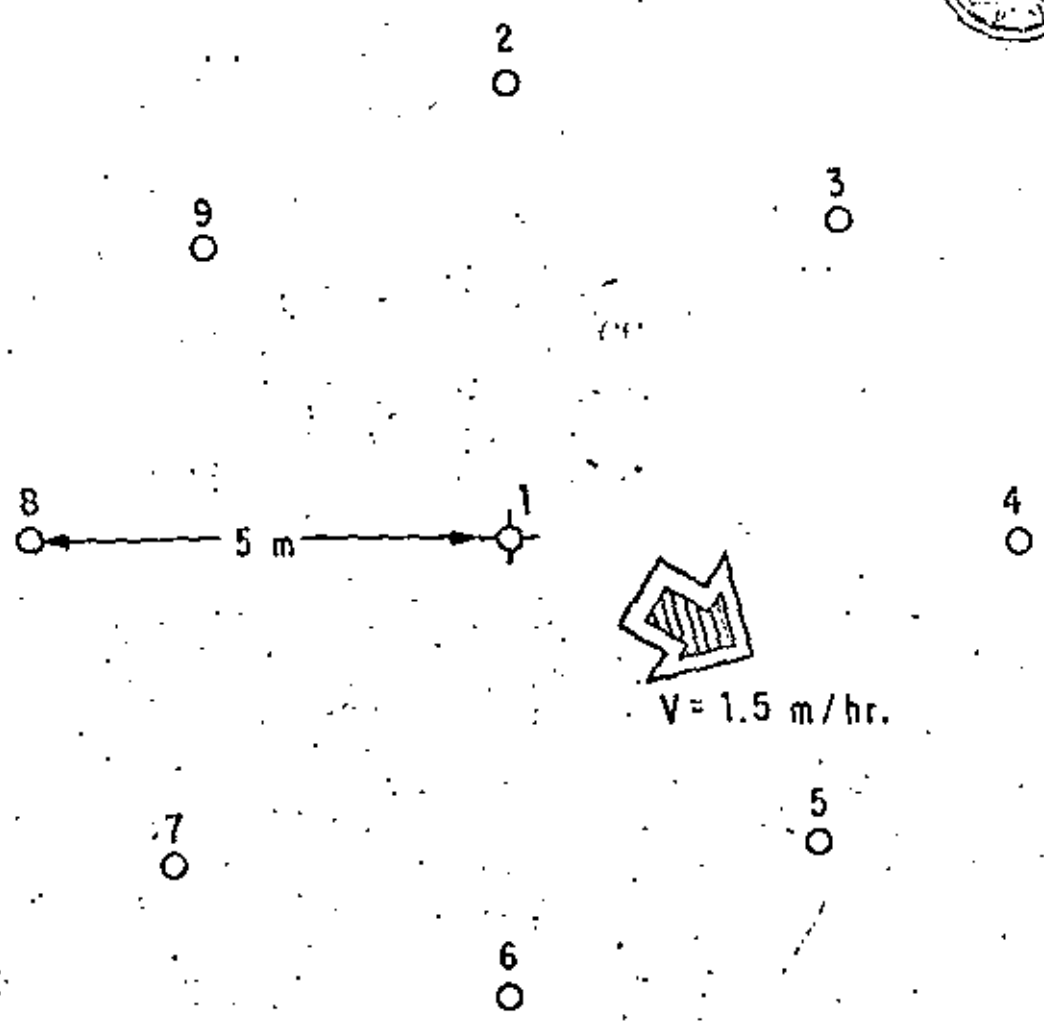


FIGURA 3



$$v = \frac{d}{t}$$

d = 5 metros
t = 180 minutos

EXPLICACION

- ⊕ POZO DE INYECCION
- POZOS DE MUESTREO


 DIRECCION Y VELOCIDAD DEL FLUJO DEL AGUA SUBTERRANEA OBTENIDO POR MEDIO DE TRAZADORES

FIGURA No. 4

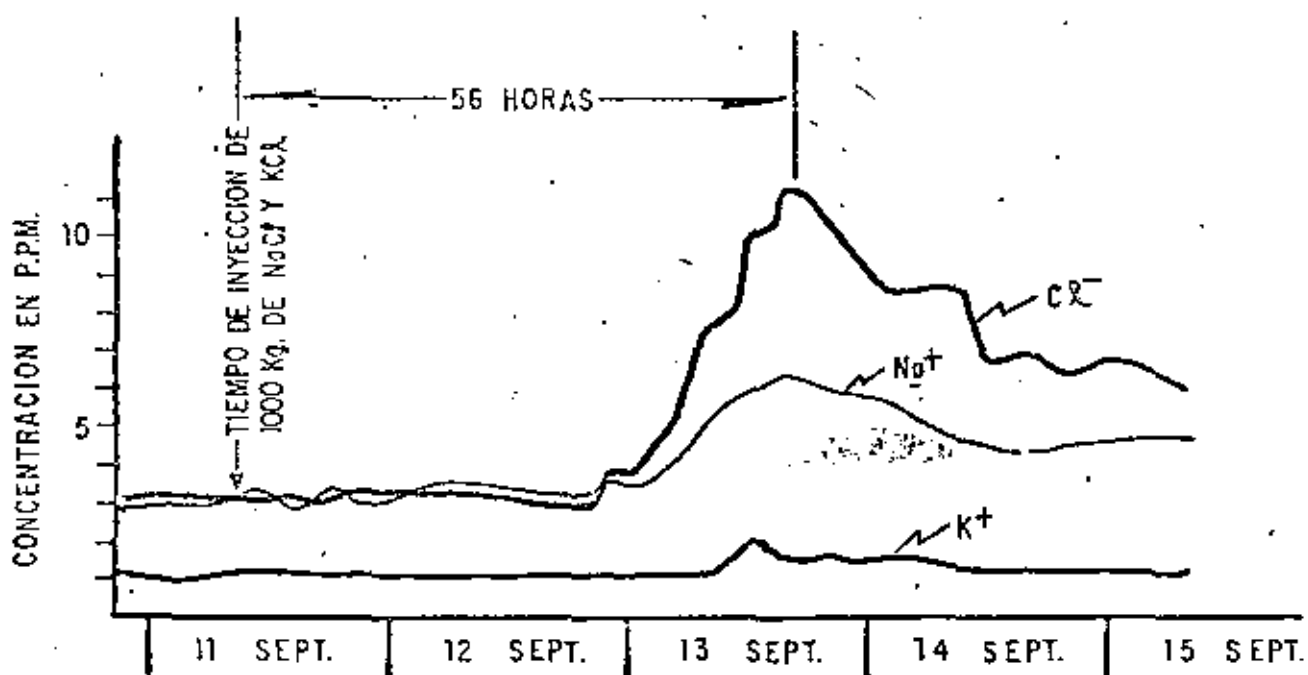


FIGURA 5



Fig. 6



centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS
DE AGUA SUBTERRANEA

TECNICAS GEOFISICAS DE EXPLORACION

Ing. Raymond Vignaud Combas

julio, 1980



TECNICAS GEOFISICAS DE EXPLORACION

Indice :

1.- Introducción

2.- Métodos Geofísicos

2.1.- Método Sísmico

2.1.1.- Sísmica reflexión

2.1.2.- Sísmica refracción

2.2.- Método Eléctrico

2.2.1.- Método de mapas de potencial

2.2.2.- Método de relación de caída de potencial

2.2.3.- Método de resistividad

2.2.4.- Método de polarización espontánea

2.2.5.- Método de polarización inducida

2.3.- Sensores Remotos

2.4.- Método Termométrico

2.5.- Método de los Trazadores Nucleares

* Perforaciones y Estudios Geológicos, S. A.

** Departamento de Ingeniería Experimental, - S.A.R.H.

*** Investigaciones Técnicas del Subsuelo, S. A.

- 2.6.- Método del Registro Geofísico en Pozos
 - 2.6.1.- Registros convencionales
 - 2.6.2.- Registros radiactivos
- 3.- Campo de Aplicación de los Métodos Geofísicos
- 4.- Empleo de un Método Geofísico con Otro Diferente
 - 4.1.- Planteamiento del problema
 - 4.2.- Ensayos a realizar "In situ" y Aparatos de Registro
- 5.- Ejemplos de Utilización de la Geofísica
 - 5.1.- Estudio para el Proyecto de un Túnel
 - 5.2.- Estudio Empleando Dos Métodos
 - 5.3.- Estudio Realizado a Poca Profundidad
 - 5.4.- Estudio Realizado en el Interior de un Macizo Rocosos
 - 5.5.- Estudio de los Materiales de una Presa
 - 5.6.- Estudio de Localización de Cavernas Naturales o Artificiales
 - 5.7.- Estudio Sismoiástico para Cimentación de Puente
 - 5.8.- Estudio de Fugas de Agua por Medio de Trazadores
 - 5.9.- Estudio de Consolidación de Terreno
- 6.- Comentarios Sobre el Empleo de La Geofísica

TECNICAS GEOFISICAS DE EXPLORACION

1.- INTRODUCCION:

La geofísica es una ciencia que tiene actualmente en el mundo uno de los mayores desarrollos y que en México, todavía, es poco empleada.

Hace un poco más de veinte años, se destinaba la geofísica al estudio de reconocimiento de minerales (hierro, petróleo, etc...). Prácticamente no servía para resolver los problemas planteados en Ingeniería Civil. Desde esta época hasta hoy, el desarrollo de la técnica permite el empleo de la geofísica en obras de Ingeniería. Actualmente es una herramienta de gran interés para conocer el subsuelo de una futura obra.

En efecto, el conocimiento de las características mecánicas estáticas y dinámicas de las rocas "in situ", así como de su comportamiento, ha llegado a constituir, actualmente, una necesidad ineludible para el Ingeniero Proyectista a fin de poder dar los valores adecuados para cada obra de Ingeniería Civil que se construye sobre ellas.

La construcción de una obra de Ingeniería Civil pone en evidencia un conjunto de materiales homogéneos, en sus propiedades, tales como el concreto o bien el acero, cuyas características perfectamente conocidas permiten sentar las bases de un cálculo con toda seguridad.

En cambio, los macizos rocosos de cimentación son constituidos por materiales naturales complejos cuyas propiedades son susceptibles de variar dentro de un amplio rango de valores. Para integrarlos en el cálculo de una obra, generalmente, el Ingeniero se apoya sobre unas hipótesis simplificadas e introduce coeficientes de seguridad muy importantes.

Con el fin de poder eliminar las hipótesis simplificadas y cambiarlas por datos representativos, es necesario conocer y evaluar la complejidad estructural del macizo rocoso.

El objeto del presente escrito es dar a conocer los métodos geofísicos que se están empleando para tal fin, limitándose en los casos que encuentran los mineros, petroleros y civiles a realizar sus obras, o sea, accesibilidad a un filón mineral, trazo de un gasoducto, cimentaciones de obras tanto superficiales como subterráneas, por ejemplo.

En vista de lo anterior, el empleo de los métodos geofísicos permite tener un mejor conocimiento del comportamiento mecánico de los macizos rocosos, apoyándose en la geología, ensayos "in situ", y en laboratorio, a menor costo y en un tiempo reducido.

En función de los problemas planteados, se verá si el empleo de la geofísica permite resolverlos o no, y, en caso positivo, se procede a la elección de uno o varios métodos para la solución del caso.

Cada vez que el empleo de la geofísica es necesario, es indispen-

- sable definir el nivel en que se desea obtener los resultados. En efecto,
- realizar una prospección detallada en un lugar en donde se necesita solamente unos datos de orientación, no corresponde al objetivo propuesto y encarece el estudio, mientras que la obtención de unas cuantas mediciones, en el caso necesario de detalle, da una imagen, en muchos casos, distorsionada de la real y que son la base de cambios de proyectos cuyos resultados son, generalmente, un encarecimiento de las obras, muchas veces, inútil.

Es importante definir con anterioridad si se trata de un proyecto de factibilidad o ya aprobado, de una construcción, conservación de obra, etc.

2.- METODOS GEOFISICOS :

Teóricamente cualquier método puede emplearse para resolver los problemas planteados en el momento de realizar la exploración. Sin embargo, entre ellos, existen unos más útiles que otros.

Dentro de la posibilidad que ofrece la geofísica, los métodos de mayor interés actualmente son:

- la sísmica
- la eléctrica
- la radioactividad
- la termometría

A continuación se da un breve rescatatorio de cada uno de estos métodos y los casos en que puedan ser empleados.

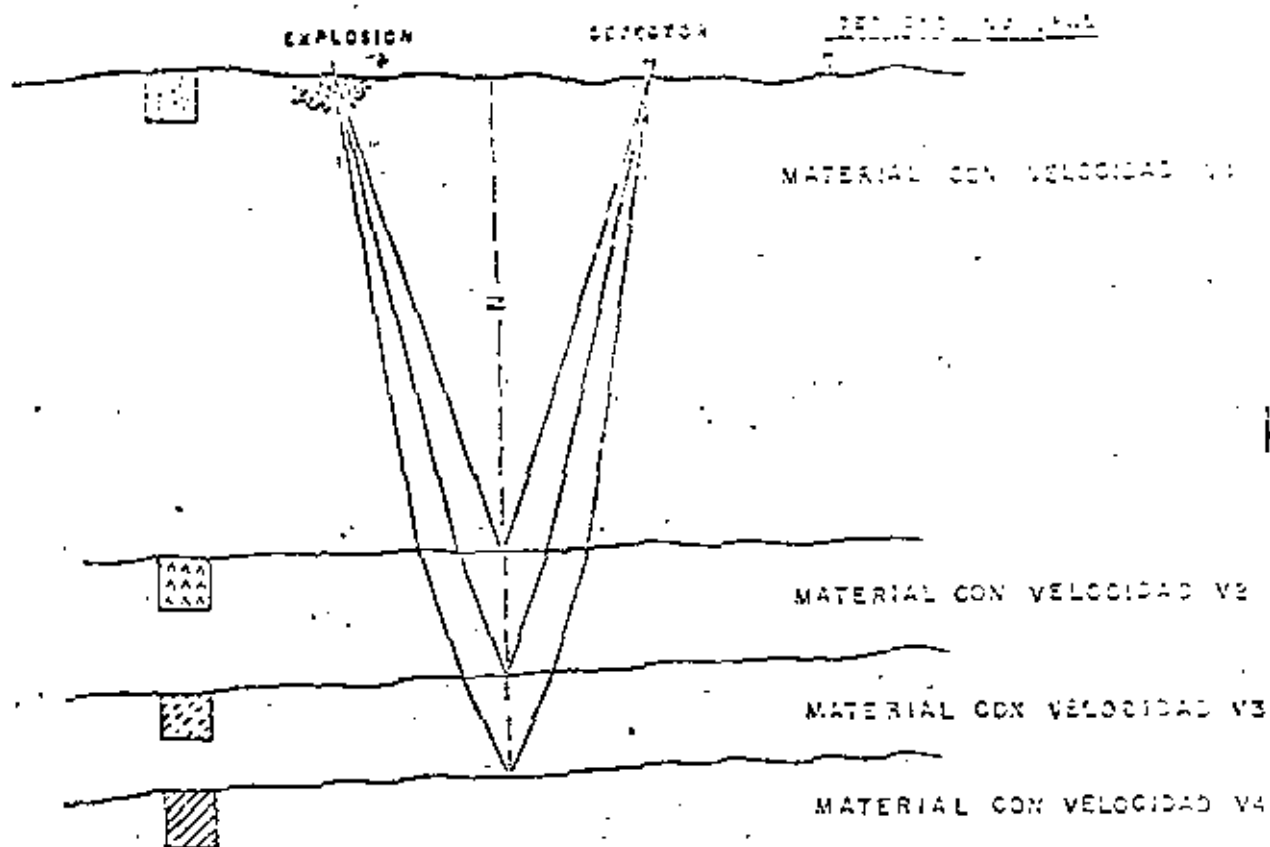
2.1.- Método Sísmico:

Cuando se provoca artificialmente una oscilación en un punto del suelo, el movimiento inicial se transmite al medio circundante en forma de vibraciones llamadas sísmicas o sísmo-elásticas. Este método está basado en las diferencias de propagación de las ondas elásticas en medios de constitución diferentes. Estudiando las reflexiones o refracciones de las ondas, se podrán deducir: profundidades, espesores de capas y calidad del o de los materiales investigados.

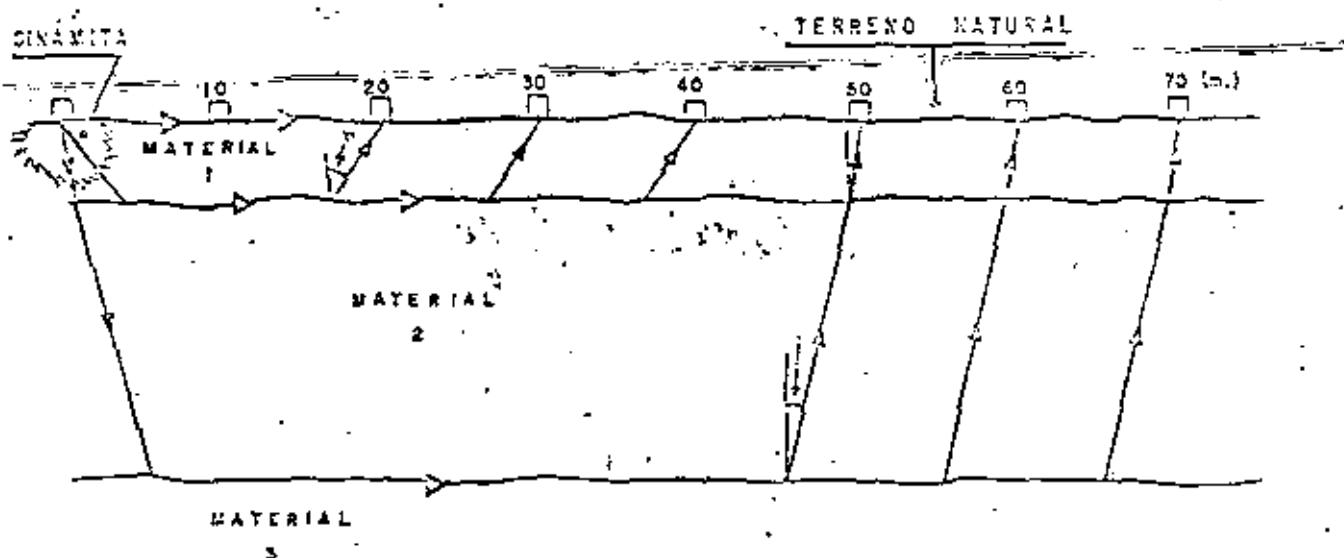
Cuando se provoca una oscilación, dos tipos de ondas diferentes independientes (en su propagación) entre ellas dan origen, por una parte, a las ondas longitudinales que se propagan por compresiones o dilataciones sucesivas y por otra a las ondas transversales que se propagan sin variación de volumen y que se denominan también ondas de distorsión o de esfuerzo cortante.

2.1.1.- Sísmica reflexión:

Sirve también para el reconocimiento de los fondos marítimos. Se mide el tiempo que invierte una onda en hacer el trayecto entre el punto de origen de las oscilaciones y el receptor (geófono) después de



PRINCIPIO DE LA SISMICA REFLEXION



PRINCIPIO DE LA SISMICA REFRACCION

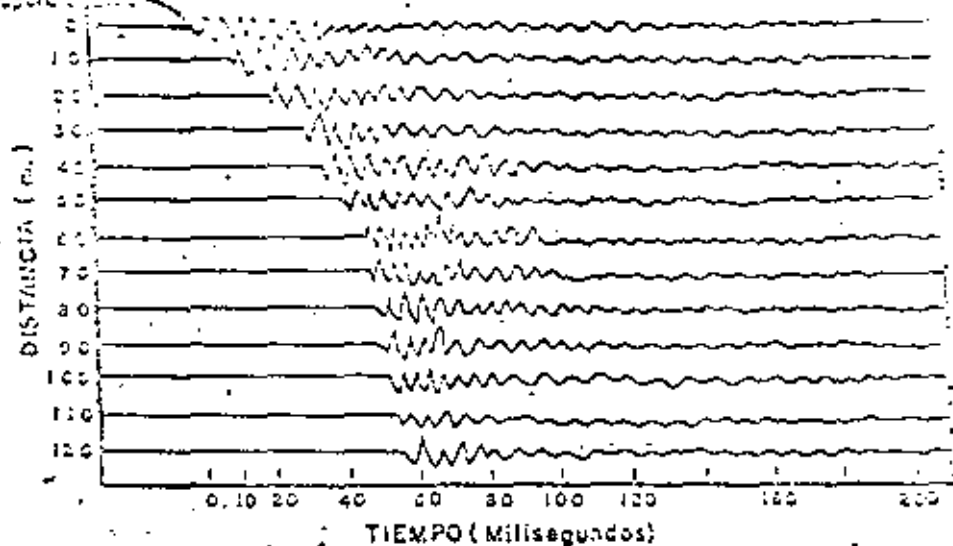
reflexionarse sobre una superficie de contacto entre dos terrenos de velocidad distinta. Este procedimiento, muy sencillo en teoría, necesita una maquinaria bastante complicada. La complejidad de los aparatos empleados se debe a la necesidad de poder determinar con seguridad la onda de regreso cuando todavía la superficie del suelo esta en movimiento. Cuando existe una reflexión (cuando la onda de regreso llega a los aparatos), se observa un desplazamiento simultáneo de todos los geófonos que viene a superponerse a los movimientos anárquicos precedentes. En este caso se define el tiempo total de la onda y así se obtiene la profundidad del estrato, en función de él, de la distancia entre la emisión y la recepción y la velocidad de la capa superior.

Este tipo de prospección es de los más precisos para determinar y medir el espesor de los estratos. Para que funcione bien, es necesario una cierta profundidad. Su uso es general para los reconocimientos petrolíferos. Infortunadamente, su empleo a profundidades pequeñas es difícil. Además no aporta datos sobre la calidad de los materiales estudiados, tal como la alteración, fracturamiento, etc.

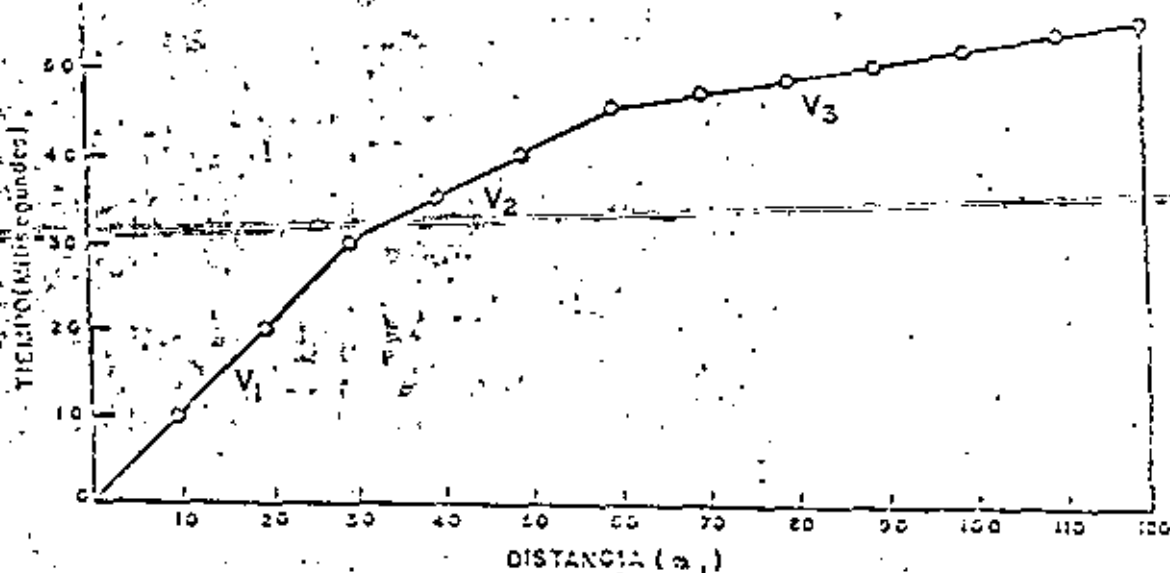
2.1.2.- Sísmica refracción:

En obras de Ingeniería Civil se requiere con frecuencia el empleo de un método que reconozca grandes espacios de terreno a poca profundidad. Es justamente el método de refracción que mejor se adapta a este tipo de estudio. La teoría matemática en que se fundamenta este método -

Tiempo en que sucede
al llegar al punto



OBTENCION DE SISMOGRAMAS



DROMOCRONICA CORRESPONDIENTE

SIEMICA REFRACCION

es muy conocida, sigue prácticamente las leyes usuales de la óptica. Se emplean ondas elásticas producidas por medio de perturbaciones instantáneas del estado de tensión del material. Estas ondas se propagan siguiendo leyes que dependen de las características mecánicas del sólido y su entorno. La energía necesaria para producir estas ondas es muy variable, - tiene en cuenta tanto el volumen de los materiales como sus características mecánicas. La forma de registro empleado es función del tipo de datos a obtener; será diferente si se trata de un reconocimiento estructural, cimentación de presa o medir la decompresión de la roca alrededor de una excavación.

Una vez producido el impacto, la onda artificial llega sucesivamente a cada receptor (geófono), el cual transforma la energía mecánica en onda eléctrica y por medio de amplificadores, se registra el fenómeno sobre película, papel sensible o contador de tiempo, según el tipo de aparato empleado. Con el tiempo de registro y conociendo la ubicación de cada receptor, se traza en coordenadas rectangulares el diagrama correspondiente, dibujando en abscisas las distancias y en ordenadas los tiempos de propagación. Este diagrama se llama "dromocrónica" y constituye la base de los cálculos que permite obtener velocidades de propagación, profundidades e información sobre la calidad de los materiales.

2.2.- Método Eléctrico:

Este procedimiento permite poner en claro las diferencias que -

puedan existir entre las propiedades eléctricas de diversas rocas. Se miden los potenciales naturales del terreno o inyectados artificialmente, después de haber anulado los naturales. Con los datos de campo se realizan varios diagramas que permiten interpretar cualitativa y cuantitativamente las mediciones realizadas. La prospección eléctrica es uno de los procedimientos geofísicos que permite usar muchas variantes para adaptarlas a la resolución de cada problema.

Los métodos eléctricos se basan en el estudio de la circulación de una corriente eléctrica (natural o artificial) en el subsuelo y se llevan a cabo mediante técnicas de medición de ciertas propiedades del campo eléctrico.

La operación consiste en medir, a partir de la superficie, los efectos producidos en el flujo de una corriente eléctrica por su paso a través de las formaciones que luego son correlacionados con información geológica a fin de definir las estructuras del subsuelo.

Existen varios métodos de investigación que se fundan en el estudio de la circulación de la corriente eléctrica, a fin de establecer una relación entre la propagación de la corriente y las características físicas del subsuelo.

Esta circulación se produce en forma natural mediante corrientes telúricas, o en forma artificial, cuando se introduce una cantidad de corriente conocida. Todos los materiales facilitan en mayor o menor --

grado el flujo de la corriente, ya sea a través de los elementos sólidos -- (conductividad electrónica) o por medio de los iones de las sales disueltas en el agua que ocupa intersticios de las rocas y suelos (conductividad iónica).

Una circulación artificial de la corriente es la que se lleva a cabo creando un campo de potencial al introducir una corriente continua o alterna de baja frecuencia, de intensidad conocida y medir los efectos que dicha corriente provoca, es decir, medir el valor del potencial o de alguna otra cantidad asociada con este flujo de electrones.

Para la prospección sobre las características de roca y suelos, los métodos eléctricos resultan de gran valor, porque la conductividad iónica está relacionada con el volumen de los poros y con la disposición y el volumen de los poros reemplazados por agua, lo que significa que si un terreno es compacto, presentará una resistencia elevada al paso de la corriente eléctrica; en caso contrario, si es poroso, tendrá baja resistencia, la cual disminuye más si los poros contienen agua y más aún si es agua salada.

En la prospección eléctrica, lo más común es emplear corriente continua, estableciendo contacto entre los aparatos de medición (transmisor y receptor) y el suelo, protegiéndolos de fenómenos parásitos como la polarización y la resistencia. También es posible utilizar corriente alterna para aprovechar fenómenos de inducción de tipo electromagnético.

Los diferentes efectos que se producen en el subsuelo y que son medidos en superficie, han dado lugar a diferentes métodos de prospectión que se conocen como: mapas de potencial, relación de colinas de potencial, resistividad, polarización espontánea y polarización inducida.

2.2.1.- Método de mapas de potencial:

Consiste en la medición, en un sistema bipolar o cuadrupolar, de la diferencia de potencial natural o cuando se emite una corriente eléctrica de intensidad constante.

La interpretación de las líneas equipotenciales es generalmente de tipo cualitativo y se lleva a cabo observando sus distorsiones que presentan alrededor de cuerpos conductores, lo que permite dar idea sobre su forma y configuración. También se hace la interpretación por las desviaciones sistemáticas semejantes a refracciones del campo potencial, -- cuando se tienen dos terrenos de resistividad diferentes.

El método de líneas equipotenciales es el indicado para la búsqueda de cuerpos de extensión lateral reducida y situados a poca profundidad y, desde luego, que posean una conductividad contrastada con el medio encajonante. En contraposición, este método resulta poco eficiente para el estudio de formaciones horizontales interestratificadas, donde las equipotenciales no sufren ninguna distorsión.

El método de mapas de potencial pueda ser usado en la detección

de cavidades cercanas a la superficie que contengan aire o rellenas de otro material, por ejemplo arcilla como sucede en zonas de caliza kárstica.

2.2.2.- Método de relación de caída de potencial:

El método de relación de caída de potencial está basado en la medición no de diferencias de potencial, que generalmente son pequeñas, sino de coeficientes de caída de potencial susceptibles de variaciones importantes.

Básicamente, el principio de medición es el mismo que utilizan los otros métodos eléctricos, empleándose dos electrodos de corriente A y B y tres electrodos de potencial M, N y P generalmente perpendiculares a los primeros. Se trata de establecer las caídas de potencial entre los electrodos M, N, P y establecer su relación con respecto a un electrodo de corriente (generalmente A) ya que el otro (B) considerándose al infinito, para fines de cálculo puede quedar eliminado.

Las ventajas que ofrece este método es dar más detalle que el método de resistividad en formaciones verticales de poco espesor (diques, filones, etc.)

En contraposición, existe el hecho de que las anomalías parásitas que se generan con los conductores de superficie son difíciles de eliminar y se corre el riesgo de que variaciones más importantes producidas por anomalías profundas queden enmascaradas, y por lo tanto falsear la

información buscada. Esta es una de las razones por la que el empleo de este método, anteriormente en boga, ha ido perdiendo aplicación generalizada.

Si la relación de caídas de potencial se traduce a resistividades, la interpretación puede hacerse utilizando los mismos criterios que en el método de resistividad, simplificándose el cálculo por el hecho de tener solo un electrodo de emisión.

2.2.3.- Método de resistividad:

Esta técnica utiliza un dispositivo cuadripolar para medir tanto la intensidad I como la diferencia de potencial V , lo que permite calcular la resistividad aparente de un terreno.

La oposición que muestra los materiales al paso de la corriente, es una resistividad aparente que resulta ser una función de la resistencia específica real de los terrenos, o su recíproco que es la conductividad, que afectan la circulación de la corriente. Al hacer una investigación por el método de resistividad eléctrica, la base fundamental de ésta es determinar y analizar las resistividades aparentes. La resistividad de un material es definida como la resistencia en ohmios entre las caras de un paralelepípedo unitario de material. La unidad usualmente empleada es el ohmio metro cuadrado por metro, o el ohmio metro.

La resistividad depende de las propiedades eléctricas del suelo y

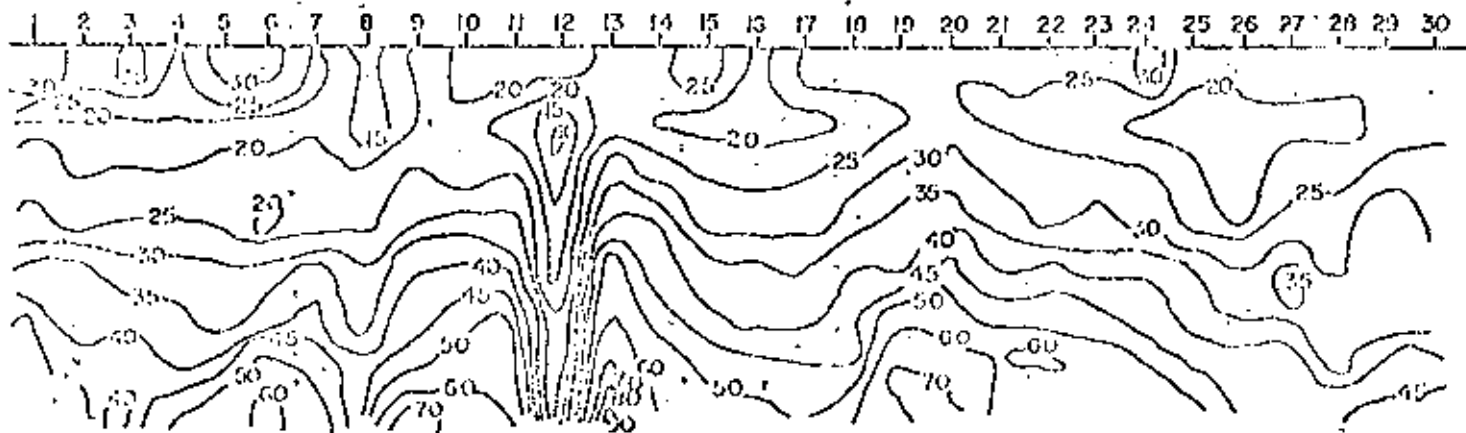


DIAGRAMA REPRESENTANDO LINEAS DE ISORESISTIVIDADES

METODO ELECTRICO RESISTIVO

de la separación de los electrodos de corriente y potencial. Cuando en la medición se lleva a cabo haciendo sondas eléctricas verticales, se usan dispositivos de medida que facilitan el cálculo de las constantes geoelectricas.

El método permite no sólo el estudio de formaciones horizontales, sino también de cuerpos subverticales tales como fallas, filones o diques y a profundidades mayores que no son registradas por otros métodos eléctricos.

La interpretación de resultados se lleva a cabo utilizando los valores de resistividades aparentes, a partir de los cuales se construyen diagramas de resistividad e isorresistividad aparentes, permiten visualizar en forma independiente o global la imagen de la estructura geológica del subsuelo. Este tipo de estudio permite detectar las anomalías importantes y la profundidad a la que se encuentran. Este método es el más apropiado para definir estructuras con materiales de diferentes calidades o contenido de humedad.

En la práctica, numerosas experiencias han permitido señalar la bondad del método resistivo, aclarando que las medidas resistivas no determinan ni la presencia de agua ni el tipo de material que hay en el subsuelo, sino que, en conjunto de medidas, determinan como es la distribución de la corriente eléctrica en el subsuelo, lo que indudablemente está relacionado con la estructura. La interpretación y calibración posterior de las medidas con datos de perforaciones permite ver, hasta entonces,

cual es el horizonte o cuerpo que interesa a la investigación.

La ventaja del método, calibrado con perforaciones, es que no se tiene una información puntual, sino una información tridimensional de toda una zona sujeta a estudio. Es por eso que la práctica aconseja que se obtenga una cantidad suficiente de mediciones para poder registrar con seguridad las variaciones que muestran los terrenos, pues un sólo sondeo eléctrico puede estar afectado por influencias laterales -- que distorcionan la realidad.

2.2.4.- Método de polarización espontánea:

El método se basa en la medición de las propiedades que poseen ciertos cuerpos de emitir una corriente eléctrica bajo condiciones bien definidas. Esta propiedad se llama polarización espontánea.

La polarización se produce en materiales bastante conductores y la diferencia de potencial natural que se genera es lo que se trata de medir en este tipo de prospección, es decir, las corrientes parásitas que son susceptibles de medirse y de interpretarse tales como la polarización de minerales muy conductores o la debida a fenómenos hidrológicos (electrofiltración).

Para medir la polarización se requiere de un potenciómetro, dos electrodos impolarizables y cable conductor. Las mediciones se efectúan en forma de líneas perpendiculares a la zona o cuerpo donde se supone la

mineralización. Se coloca el aparato y su electrodo en un punto fijo, -- mientras que el otro se mueve de una distancia siempre constante.

La interpretación de las medidas es generalmente de tipo cualitativo y solo en casos particulares se puede calcular la profundidad de un yacimiento dando sus dimensiones.

Los potenciales medidos son registrados a escala conveniente sobre planos que indican la ubicación de las estaciones de medición; en ellos se trazan las equipotenciales en forma semejantes a los mapas de potencial. El estudio de estas equipotenciales permite precisar la forma y condiciones del yacimiento o material conductor.

En general es difícil precisar la naturaleza exacta del yacimiento, sin embargo, en el mejor de los casos se puede saber si se trata de masas metálicas, grafito o procesos de electrofiltración. Pero también todos sabemos que esto no es el objetivo de la geofísica por métodos eléctricos, sino el de precisar la existencia de una anomalía o yacimiento conductor.

Otra forma de interpretar es mediante el análisis de la repartición de potenciales. Los cuerpos mineralizados funcionan como una pila y la diferencia de potencial medida en superficie es debida a la resistencia del yacimiento. Mientras más profundo está el yacimiento, más débil es la corriente de llegada y más pequeña la caída ohmica. Se considera que para fines prácticos son interpretables valores superiores a 50 mv, valores inferiores resultan no provechosos.

2.2.5.- Polarización inducida:

Cuando, por medio de un dispositivo tetrapolar clásico A.M.T. B, se envía en el subsuelo una corriente entre A y B, y que se interrumpe bruscamente esta corriente, se observa que subsiste entre los electrodos MN una diferencia de potencial que se disipa en algunos décimos de segundo. Este potencial residual se llama polarización inducida.

El paso de una corriente eléctrica en una roca se acompaña de procesos electroquímicos, cuyo carácter e intensidad están subordinados esencialmente a las propiedades físicas y químicas de esta roca.

Es conocido que una roca está constituida por un conjunto complejo de partículas cuya composición mineralógica y propiedades físicas pueden ser diferentes. En efecto, pueden existir en una roca partículas metálicas, a conductibilidad electrónica o partículas poco conductoras, tales como los silicatos asimilables a dieléctricos, pero la alteración de estos silicatos da lugar a una formación arcillosa que el agua de imbibición hace muy conductora.

En este tipo de estudio, la interpretación es cualitativa y a veces cuantitativa. Es siempre cualitativa en lo que se refiere a los resultados de perfiles. Para un terreno subhorizontal, las anomalías se encuentran a la vertical del o de los cuerpos perturbadores. La intensidad de estas anomalías y el conocimiento de los factores geológicos locales permiten, en la mayoría de los casos, de hacerse una idea sobre el origen del cuerpo

perturbador.

2.3.- Sensores Remotos:

El sol es la principal fuente de energía en los procesos atmosféricos. La energía solar es en parte reflejada y en parte absorbida por la atmósfera. Una porción de la energía radiativa absorbida por la atmósfera es remitida y puede dispersarse en el espacio o regresar a la superficie de la tierra.

La distribución del balance térmico nos indica que gran parte de la energía proveniente del sol es reflejada al espacio (42%) mientras que el 14% es absorbida por la atmósfera y el 44% por la superficie de la tierra. Una porción de la energía solar absorbida por la atmósfera y la superficie de la tierra es remitida. Se estima que cerca del 58% de la energía solar reingresa al espacio; las diferentes porciones de esta energía radiante son útiles para los dispositivos instalados en satélites.

La identificación de rocas, minerales y suelos es posible por medio del análisis de la distribución de las curvas de reflectancia espectral. Las diferentes clases de reflectancia y emitancia pueden ser registradas a través de ventanas atmosféricas y sirven para determinar los tipos de rocas y suelos.

Con los sensores remotos se obtienen dos tipos de datos de la radiación. La primera es la distribución espectral de la radiación emitida y

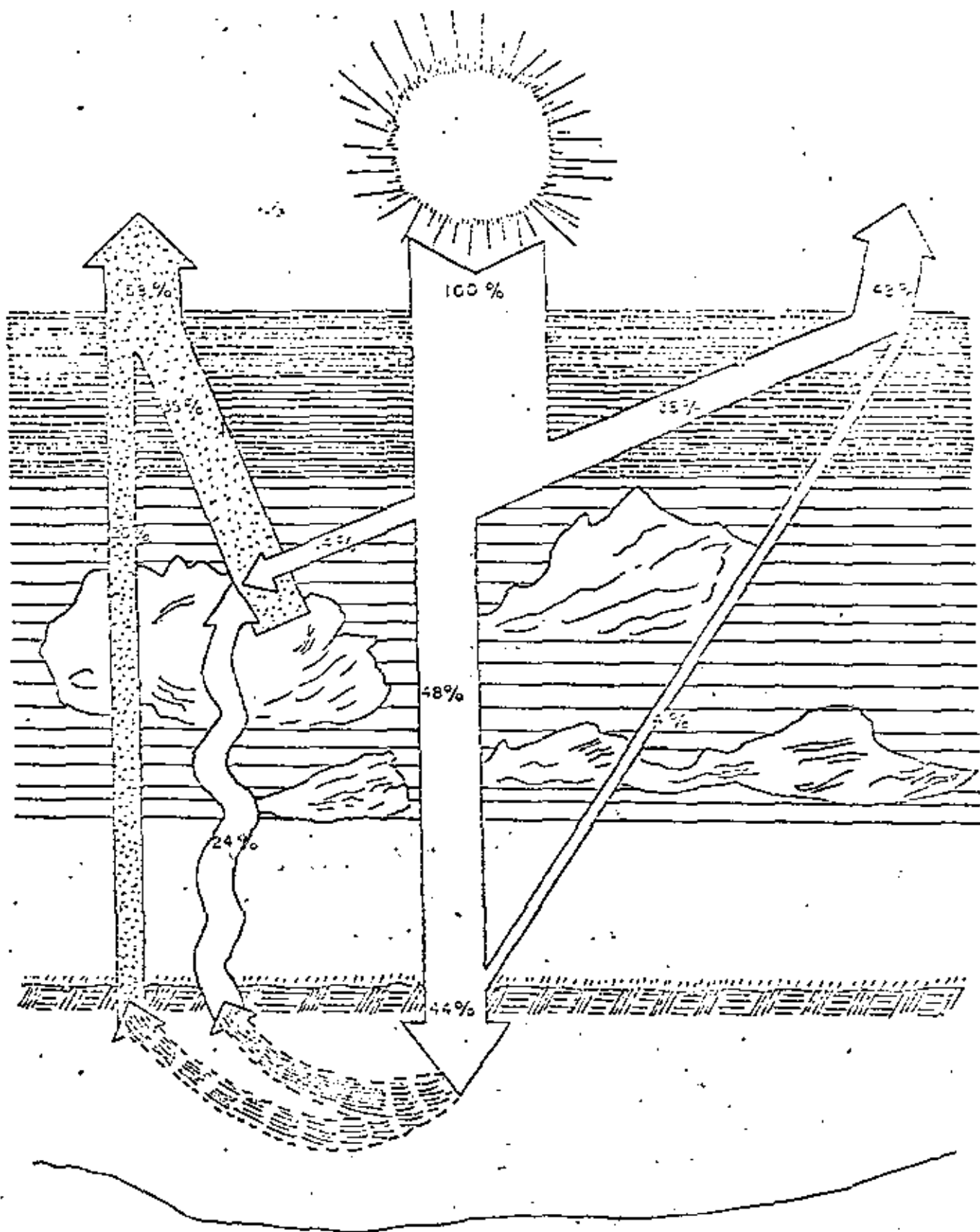


DIAGRAMA DEL BALANCE TERMICO DE LA TIERRA

SENSORES REMOTOS

reflejada por un material. Esto no requiere conocimiento geométrico para distinguir la naturaleza del material, es decir, que el material puede determinarse por sus características espectrales. El segundo tipo de datos es la distribución espacial de la radiación registrada. Aquí los patrones radiactivos se usan para determinar la naturaleza del objeto y su consideración geométrica.

Para el reconocimiento de la superficie terrestre, se utilizan dos tipos básicos de exploración. Estos emplean dispositivos que registran la imagen o la energía emitida de la tierra. Los dispositivos de registro pueden ser cámaras o barredores (scanner). Las cámaras proporcionan la distribución espectral y espacial simultáneamente. Los barredores se utilizan en aquellas regiones donde no existen materiales que formen imágenes de alta resolución.

La adecuada evolución para operaciones desde satélites, globos o aviones requiere de una amplia recopilación de datos, obtenidos de mediciones de laboratorio y campo, tales como composición, características espectrales y polarización y reflectancia de los materiales.

2.4.- Método Termométrico:

Este método está basado en la medición de la temperatura del suelo y del subsuelo. Se emplea la noción de gradiente vertical y de grado geotérmico.

El gradiente vertical en el interior de un terreno es el cociente de la diferencia de temperaturas por la diferencia de profundidades; es en resumen, la diferencia de temperatura por unidad de profundidad.

El grado geotérmico es la cantidad de metros (o centímetros) que se debe aumentar a la profundidad para que la temperatura suba un grado centígrado. Esto interesa particularmente a los Ingenieros de Minas.

Este tipo de investigación es el que más se acerca a la meteorología. Se distinguen dos categorías de estudios: la primera interesa los primeros metros de la superficie y la segunda investiga las capas profundas. En ambos casos se miden las temperaturas con termómetros o con pares termoeléctricos según el caso.

La medición de las temperaturas superficiales sirven, por ejemplo, para la detección de fracturas, venidas de aguas, variación del nivel freático superficial, etc.. La medición profunda sirve para la clasificación de los diferentes niveles de una perforación.

2.5.- Método de los Trazadores Nucleares:

Este método se basa en el estudio de la circulación del agua en las rocas por medio de trazadores nucleares, consiste en el reconocimiento de la composición isotópica ambiental de las aguas.

La ocurrencia de agua en rocas fracturadas da lugar a problemas que no ocurren en el caso de acuíferos claramente definidos. En general,

tales terrenos tienen una alta capacidad de infiltración. La infiltración puede ser uniforme o concentrada como en el caso de hundimiento que son características de áreas calcáreas. En este caso, es necesario, a veces, establecer positivamente la conexión entre los hundimientos y uno o más manantiales y estudiar la dinámica del sistema, midiendo el tiempo de tránsito y almacenaje. Es por lo tanto natural que el uso de radioisótopos puede llevarnos a considerarlos como trazadores en vista de su alta sensibilidad de detección. Se puede utilizar una combinación de radiotrazadores para estudiar la dinámica de sistemas de complejos.

Los radioisótopos satisfacen los mismos criterios para el uso de cualquier trazador. Este deberá presentar el comportamiento del agua que va a ser marcada y no sufrir pérdidas debido a absorción durante el paso del agua a través del acuífero o del medio a través de que pase el agua. -- Con estos criterios en mente se deben considerar dos tipos de trazador radiactivo:

a). - Es aquel donde uno de los átomos de la molécula de agua es radiactiva, que será el trazador ideal. Para todo fin práctico, el tritio es el trazador radiactivo de este tipo.

b). - Es un radiactivo en la forma de compuesto químico soluble en agua.

Hay una variedad de radioisótopos con diferentes tipos de emisión radiactiva y vida media apropiada para una investigación particular, sin embargo, el problema se centra en la necesidad de marcar un compuesto

que no sufra pérdidas por absorción.

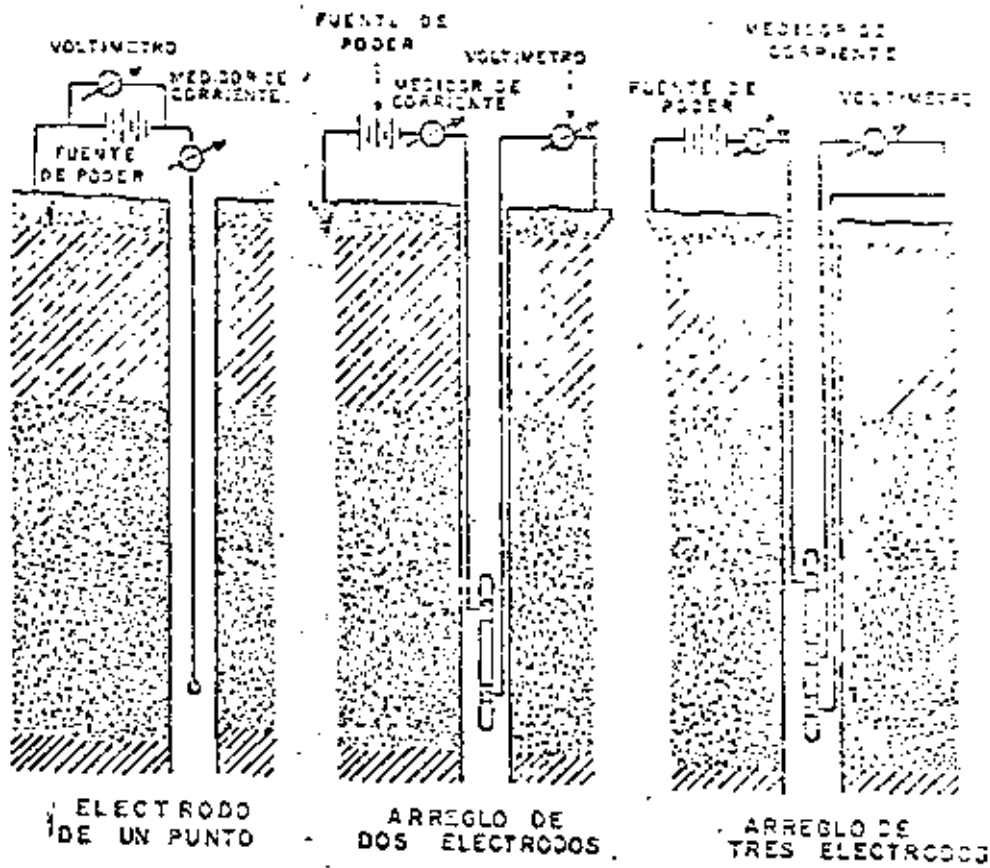
Se puede usar también un trazador no radiactivo, usando métodos de análisis por activación del mismo modo que con radioisótopos artificiales, soamente que la detección se hace en base a que el trazador es hecho radioactivo y radiando las muestras en un reactor.

2.6.- Método del Registro Geofísico en Pozos :

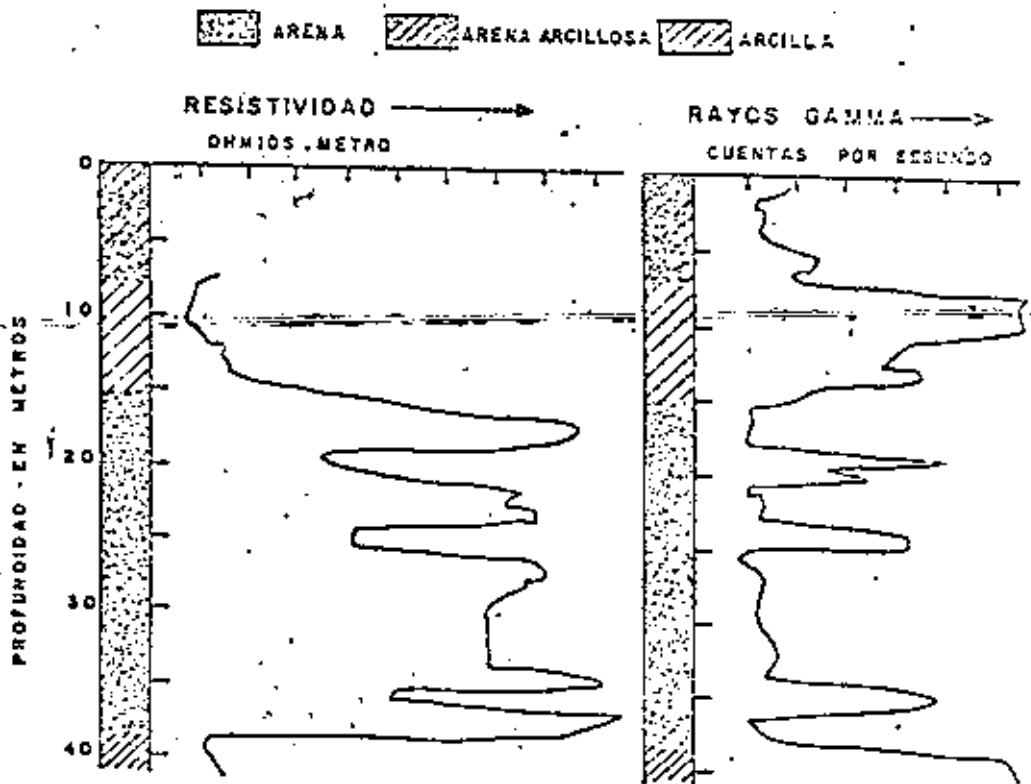
Este método se emplea de tal forma que es casi insustituible en la técnica de los sondeos mecánicos. Se destina al reconocimiento del subsuelo (sin límite de profundidad), usando una perforación previa. Con el transcurso del tiempo, este tipo de investigación fue combinando, entre sí, varios métodos geofísicos. Principió con el registro eléctrico, siguió con el registro termométrico, después el sísmico y se prolongó con el radiactivo.

2.6.1.- Registros convencionales

El registro de potencial espontáneo es el registro de la diferencia de potencial que existe entre un electrodo de referencia situado en la superficie y otro electrodo que se introduce en el pozo. Esta diferencia de potencial es causada principalmente por dos factores: la electrofiltración, que es función de la diferencia de carga hidráulica, que origina que el fluido fluya hacia las formaciones permeables o viceversa y el potencial electroquímico, que es función de las actividades iónicas del lodo o agua en el pozo, respecto a la actividad del agua en las formaciones permeables adyacentes. El potencial originado por efecto electroquímico es generalmente



EJEMPLOS DE ARREGLO DE ELECTRODOS EN UN REGISTRO ELECTRICO



COMPARACION DE UN REGISTRO RESISTIVO CON UN REGISTRO DE RAYOS GAMMA

mayor que el producido por electrofiltración.

En el registro eléctrico, la resistividad es determinada mediante la emisión de una corriente eléctrica en el interior del pozo y midiendo la caída de potencial causada por esta corriente. Existen dos tipos principales de dispositivos para medir resistividades. El primero consiste en medir la resistividad entre un punto situado en la superficie del terreno y otro en el interior del pozo. El segundo consiste en colocar los electrodos de diferencia de potencial y los de emisión de corriente en el interior del pozo. Con este último dispositivo es posible obtener resistividades reales, mientras que con el primero no.

La interpretación de los registros eléctricos se basa en los contrastes de resistividad que existen entre los distintos tipos de formaciones que atraviesa el pozo. En estos resultados se deben tener en cuenta las características de la perforación como son el diámetro, el tipo de máquina, el lodo, la presión de inyección, por ejemplo.

En el caso del registro sísmico, se utilizan vibraciones emitidas a lo largo de la perforación que se miden a varias profundidades. Estas vibraciones pueden ser del tipo longitudinal o transversal según la necesidad. Además de la obtención de las velocidades sísmicas de cada formación, se puede medir la atenuación del tipo de ondas emitido en ella, a lo largo del pozo.

El registro termométrico consiste en equipar la sonda que va a bajar en la perforación de un termopar, cuya resistencia varía rápida y linealmente con la temperatura. Cualquier variación de temperatura se traduce en diferencia de potencial que se registra en la superficie por medio de un puente de Wheatstone. Como cada tipo de material tiene una constante térmica propia diferente, se obtiene un corte termométrico a lo largo del pozo, teniendo en cuenta la variación del gradiente geotérmico.

Todos estos métodos tienen gran ventaja sobre la obtención de muestras en lo que respecta la profundidad. En efecto, su determinación es mucho más precisa que la que se obtiene cuando se consigue el testigo de los materiales.

2.6.2.- Registros radiactivos.

La investigación geofísica por los métodos de registro radiactivo incluye:

- la radiación natural o método de gammas.
- el método de densidad o método gammas-gammas.
- la radiación provocada o método de neutrón y neutrón-gammas.

El método de gammas registra la radiactividad natural de las rocas. La radiación proviene de elementos radiactivos tales como potasio 40 y las series del uranio y del torio con sus productos de decaimiento. Una --

estimación cuantitativa del nivel de radiactividad de las rocas, es generalmente representada como el radio equivalente (RaEq). En las tablas No. 1 y 2 se indica, a título informativo, los límites de variación de radiactividad en algunas rocas sedimentarias, así como el contenido de radioelementos de algunas de ellas.

Se muestra claramente en estas tablas que los sedimentos orgánicos libres de arcilla y cuarzo son los menos radiactivos. Las arcillas arenosas están caracterizadas por un incremento de radiactividad particularmente en el incremento de arcilla, ya que su intervalo de radiactividad es variable. De todas las rocas sedimentarias la roca arcillosa y la pizarra tienen los más altos y, comparativamente, constantes niveles radiactivos.

La relación natural entre un estrato rocoso y su contenido radiactivo forma la base física para detectar zonas individuales por el método de radiación natural y para analizar el perfilaje geológico. La interrelación entre el nivel radiactivo de un estrato de composición homogénea y su contenido de arcilla es de particular interés en estudios geológicos.

El método de densidad o método gammas-gammas se realiza por medio de una sonda que contiene una fuerte emisora de gammas y su detector correspondiente. Cuando la sonda se mueve a lo largo de la perforación el detector mide la radiactividad gamma dispersada. Debido

TABLA No. 1

VALOR MEDIO Y LIMITES DE VARIACION DE RADIOACTIVIDAD EN ALGUNAS ROCAS SEDIMENTARIAS

TIPO DE ROCA	RaEe (10^{-12} c/g de roca)
Anidrita	0.5
Carbón Café	1.0
Roca Marina	2.0
Dolomita	0.5 - 10
Caliza	0.5 - 12
Arenisca	1.0 - 15
Arena Arcillosa	2 - 20
Caliza Arcillosa	2 - 20
Roca Arcillosa Carbonosa	3 - 25
Roca Arcillosa	4 - 30
Arcilla Bajo Mar	10 - 60

TABLA No. 2

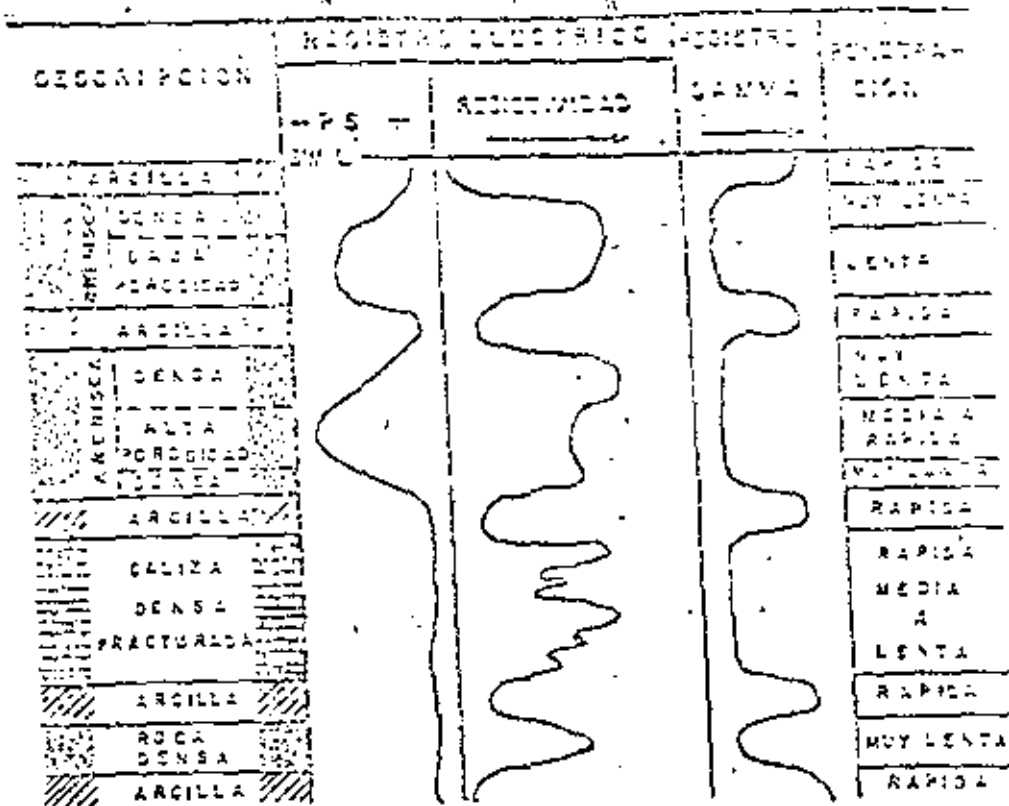
CONTENIDO DE RADIOELEMENTOS EN ALGUNAS ROCAS SEDIMENTARIA
(g/g DE ROCA)

TIPO DE ROCA	Ra (10^{-12})	U (10^{-6})	Th (10^{-6})
Arena Hasta	1.5	Hasta 4.0	-
Cuarcita	0.54	1.6	-
Arcilla	1.3	4.3	13.0
Roca Arcillosa	1.09	3.0	-
Caliza	0.5	1.5	0.5
Dolomita	0.11	0.3	-

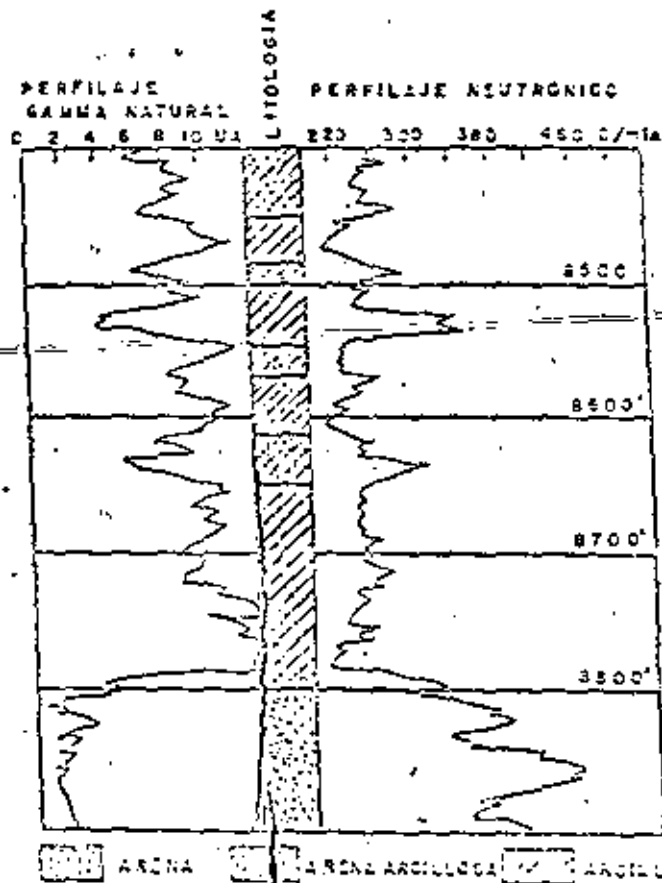
a que la cantidad de radiación gamma detectada es función de la densidad de las rocas alrededor de la perforación, el método gammas - gammas proporciona una medida de la densidad volumétrica de la roca saturada y no saturada a lo largo del pozo. La intensidad de la radiación gamma registrada depende en general de la densidad del medio circundante, la longitud de la sonda de medición, la energía de la radiación y colimación de la fuente usada, el tipo y la sensibilidad del detector, así como el material y espesor de la pared de la sonda, el diámetro de la perforación, la presencia o ausencia de ademe y la cantidad de caídos o sumandos.

En la radiación provocada o método de neutrón, esencialmente se registra la radiación neutrónica dispersada, emitida por una fuente de neutrones rápidos, cuando la sonda se mueve a lo largo de la perforación. Este método se basa en la relación funcional de la gran sección transversal de los átomos de hidrógenos para detener los neutrones rápidos y llevarlos a energías térmicas. El método neutrónico nos da una medida del contenido de hidrógeno del medio a lo largo del perfil de la perforación y puede ser usualmente usado en términos de humedad.

En el método neutrón - gammas, se registra la radiación gamma emitida por los núcleos en la formación, cuando ellos capturan los neutrones térmicos emitidos por una fuente de neutrones rápidos en la sonda de registro. Los cálculos muestran que la captura de gammas por neutrones rápidos en un medio homogéneo depende de las propiedades ---



EJEMPLO DE REGISTROS : PS , RESISTIVIDAD Y RAYOS GAMMA



EJEMPLO DE REGISTROS : DE RAYOS GAMMA NATURAL Y NEUTRONICO

moderadoras del medio, de su densidad y del número de gammas emitidas por captura neutrónica. Por ejemplo la presencia de cloro en un medio resulta en un rendimiento alto de captura neutrónica y emisión de gammas, ya que este emite aproximadamente 2.4 gammas por captura neutrónica. Este método puede usarse para obtener el perfil del contenido de humedad y para estimar la composición de ciertos elementos que forman la roca.

En estos métodos la sonda de medición se mueve a lo largo de la perforación que atraviesa la roca en la sección de investigación. Al moverse la sonda, se obtiene un diagrama del parámetro medido que se grafica en superficie. Esencialmente los resultados se obtienen en forma cualitativa.

3.- CAMPO DE APLICACION DE LOS METODOS GEOFISICOS:

Es difícil a la geología de superficie de definir de otra manera que con hipótesis los fenómenos profundos. Las perforaciones representan un reconocimiento limitado en el espacio, su cantidad es definida, muchas veces, por imperativos económicos.

En mecánica de rocas, es indispensable emplear la geofísica por razones técnicas y económicas, cuando se trata de un cierto espesor de material. La exploración directa por perforaciones, cuilicatas, etc., constituye un método, aún cuando factible, muy costoso y lento, proporcionando información puntual.

En cambio la geofísica da una información integrada y la combinación de ambas exploraciones permite resolver satisfactoriamente los problemas planteados.

Las mediciones geofísicas afectan un volumen de terreno generalmente importante. Los mejores resultados se obtienen cuando existe un contraste en los valores de los parámetros estudiados. Permiten dar una imagen de la estructura geológica o de valorar parámetros físicos como coeficiente de Poisson o módulo elástico. Además, por medio de ellas se obtiene directamente datos sobre heterogeneidades o anisotropías del conjunto geológico. Basta teóricamente analizar las modificaciones locales o direccionales de las mediciones para subrayar anomalías.

Indistintamente que se traten de proyectos o construcciones, la geofísica aporta una valiosa ayuda en los problemas de:

- Vías terrestres, aeropuertos (túneles, cortes, bancos de materiales, abastecimientos de agua, etc.)
- Cimentaciones de presas, galerías a presión, centrales hidroeléctricas (estructura, decompresión, zonas débiles, efecto del explosivo sobre la roca, etc.)
- Estructuras en obras civiles (calidad de pilotes, cimentación de edificios, zonas kársticas, etc.)
- Aguas subterráneas (rellenos, fracturación, etc.)
- En los casos relacionados con la minería o la industria petrolera,

problemas que nos interesan a resolver se vuelven de tipo civil (es decir geotécnico).

En cada uno de los grupos anteriores, la forma de pruebas y los resultados a obtener serán diferentes si se trata de proyectos, construcción o conservación de obras civiles.

Por ejemplo, para el estudio del proyecto de un túnel (carreteras o vías ferreas) o de una galería a presión subterránea (para un aprovechamiento hidroeléctrico), la investigación geotécnica se orientará de tal forma que, apoyándose en la geología, se obtenga, a partir de la superficie, los principales datos siguientes:

- Definición de la estructura del subsuelo hasta una profundidad mayor que la rasante.
- Delimitación de las zonas alteradas, fracturadas, falladas, drenadas, etc.
- Definición y orientación de los accidentes geológicos a nivel de rasante.
- Localización y orientación del trazo óptimo.
- Delimitación de los tramos en donde se da una orientación sobre el grado de dificultad previsible que encontrará la excavación de la futura obra.
- Delimitación de los portales de entrada y salida.
- Ubicación de los puntos mecánicos necesarios para el control del

estudio geofísico y complemento de información.

Como segundo caso se tiene en cuenta, un estudio a realizar durante la etapa de construcción, la investigación geofísica se orientará para dar, entre otros, las siguientes cifras.

- Comprobación con el estudio superficial (o de proyecto).
- Delimitación del espesor de material decomprimido, debido, por una parte, a la excavación y por otra al efecto del explosivo sobre el material.
- Definición de la evolución de la decompresión de los materiales de las paredes y del techo con el tiempo.
- Delimitación y valoración de las diferentes zonas en donde las características mecánicas de la roca son distintas. Es un punto importante porque va íntimamente ligado con el tipo y geometría del revestimiento, necesidad de anclajes o colocación de ademe.
- Delimitación de las zonas que necesitarán o no de un tratamiento especial por inyecciones.
- Control del efecto de un tratamiento de terreno por inyecciones, en su caso.

En lo referente al estudio orientado a conservación de obras civiles, el estudio geofísico tendrá que poner en relieve:

- La estabilidad de la decompresión con el tiempo.
- El control de la variación de la calidad de los materiales tanto naturales como artificiales.

4.- EMPLEO DE UN METODO GEOFISICO CON OTRO DIFERENTE:

Se mencionó en la introducción del presente escrito que el conocimiento de las características mecánicas de las rocas "in situ" así como de su comportamiento, ha llegado a constituir actualmente una necesidad ineludible para el Ingeniero Projectista.

Como ilustración tomaremos el caso de un proyecto de cimentación en donde se necesita del empleo del método sísmico de refracción y del método geomecánico.

4.1.- Planteamiento del problema:

Los principales problemas a resolver en el caso de un estudio de cimentaciones de cualquier obra son la estabilidad de ella y la deformabilidad de la base en donde se apoyará. Por estas razones, el conocimiento físico del o de los apoyos rocosos permitirá resolver el problema.

En primera etapa (anteproyecto) es necesario determinar el espesor de las coberturas superficiales, la delimitación de las zonas de roca alterada y/o decomprimida, la posición en profundidad de los contactos litológicos, la diferenciación entre conjuntos rocosos diferentes y eventualmente su estructura respectiva, así como una orientación sobre el valor de los coeficientes de elasticidad.

En segunda etapa (proyecto definitivo) se afinarán parámetros tales como zonas decomprimidas, zonas débiles como consecuencia de ---

fracturación o fallas, etc., dándole un valor cuantitativo a cada zona por medio de exploraciones directas "in situ" a base de perforaciones, socavones, calicatas, etc., a fin de poder aplicar los métodos de medida estáticas y dinámicas.

En el caso de una cimentación al aire libre o superficial, los aspectos relativos al espesor de las formaciones superficiales, delimitación de zonas alteradas o decomprimidas prevalecen.

En el caso de una cimentación subterránea, los aspectos de perforación y excavación, asociados a la posición de las diaclasas con la orientación de la obra predominan.

En el caso de una excavación de tipo explotación de cantera, la rotura natural del material y su volumen total disponible son unos de los problemas principales a resolver.

4.2.- Ensayos a realizar "in situ" y aparatos de registro:

Para poder aportar valores representativos al cálculo de cimentación de una obra, es necesario conocer y determinar cualitativa y cuantitativamente el mayor número de parámetros desconocidos del macizo rocoso. Los métodos que permiten determinar los parámetros físicos son de dos tipos: los estáticos y los dinámicos:

Métodos estáticos:

Como el objeto de esta ponencia se limita a la técnica geofísica

de exploración; mencionaremos solamente que se agrupan bajo esta denominación los métodos de ensayos y medidas que utilizan presiones impuestas durante un período de tiempo variable, generalmente desde unos minutos hasta horas y en algunos casos días.

5 - Métodos dinámicos:

Se agrupan bajo esta denominación todos los métodos que emplean esfuerzos rápidamente variables, producidos por vibraciones de ondas elásticas.

Las particularidades de estos métodos, muy importantes en las aplicaciones prácticas, además de las medidas de velocidad de las ondas longitudinales y transversales, están íntimamente ligadas a las características del fenómeno vibratorio y a las condiciones de propagación.

El origen de las vibraciones puede ser discontinuo, con producción de movimientos aislados (grupos de ondas) o bien continuo. Para el primer caso, lo más usual, es el empleo de explosivo o de una excitación mecánica. El segundo caso corresponde al empleo de una fuente vibratoria cuya energía y frecuencia puede regularse.

El nivel de energía, y como consecuencia la amplitud del movimiento para cada frecuencia, tiene una influencia considerable sobre el régimen de propagación. Conviene hacer notar que las excitaciones con energía sobrepasada pueden provocar esfuerzos sobre la roca que rebasen

los límites de resistencia y se abren fisuras. Este tipo de vibraciones se propaga con celeridades diferentes de las ondas elásticas, a causa de la rotura y recolocación de la roca "in situ". Para niveles muy bajos de energía, se produce en la práctica una difracción de esa energía y las ondas y frecuencias características de un cierto tipo llegan a propagarse más allá de límites alcanzados por otras ondas. Es el caso de las ondas transversales que se propagan muchas veces más allá de las ondas de compresión, en una roca muy sana.

Los aparatos que deberán emplearse por realizar y registrar las mediciones dinámicas tendrán que tener unas características tales que permitan el registro del tiempo de propagación de las ondas, su amplitud y frecuencia. Dentro de los aparatos que existen en el mercado, serán convenientes los de tipo galvanométrico o de tipo osciloscópico.

Este método tiene la ventaja de permitir la determinación de la forma y dimensiones de los sólidos en los cuales se propagan las ondas, teniendo en cuenta las refracciones y reflexiones que se muestra en ellas.

Aunque el método parece aplicarse a la mayor parte de los problemas de mecánica de roca, presenta algunas limitaciones importantes. En primer lugar, proporciona solamente las características del estado actual de los materiales, lo cual obliga a tener muy en cuenta la posible modificación de los mismos por cargas importantes o por evolución de

su naturaleza. Por otra parte como intervienen en los cálculos las características de forma de los elementos, si estas características no se conocen con suficiente precisión, se puede incurrir en errores importantes en los resultados.

De los registros dinámicos se pueden deducir, además, propiedades referentes a la absorción de energía y determinar el coeficiente de absorción intrínseco de la roca. Este coeficiente permite cálculos de amortiguamiento en los casos en que se estudian las vibraciones producidas por máquinas y, en general, de todos aquellos en que puedan tener importancia las características visco-elásticas.

El empleo del método dinámico o método microsísmico en cualquier tipo de excavación en roca (sobre todo en túneles y excavaciones subterráneas) da informaciones importantes para el proyecto y la ejecución del revestimiento. Permite además definir zonas de validez de los ensayos mecánicos y se complementan muy útilmente con ellos.

Este tipo de investigación sustituye el empirismo de las apreciaciones y permite una mayor seguridad para las obras. Al mismo tiempo, estos reconocimientos son susceptibles de permitir economías considerables para el tipo de obras que se propone construir, disminuyendo los "coeficientes de incertidumbres" a favor de los "de seguridad".

Numerosas aplicaciones de estos métodos han sido ya realizadas para obras superficiales o subterráneas, así como para el control del

estado de revestimiento, del efecto de los tratamientos de terreno con inyecciones y de la evolución de un macizo rocoso con el tiempo.

5.- EJEMPLOS DE UTILIZACION DE LA GEOFISICA:

Dentro de los numerosos estudios realizados sobre el presente tema, se eligieron nueve ejemplos por ser, por una parte, típicos y por otra, comprobados. Para unos la comprobación se realizó por medio de sondajes mecánicos y para otros, la propia construcción de la obra puso en valor la bondad de este tipo de investigación.

5.1.- Estudio para el Proyecto de un Túnel:

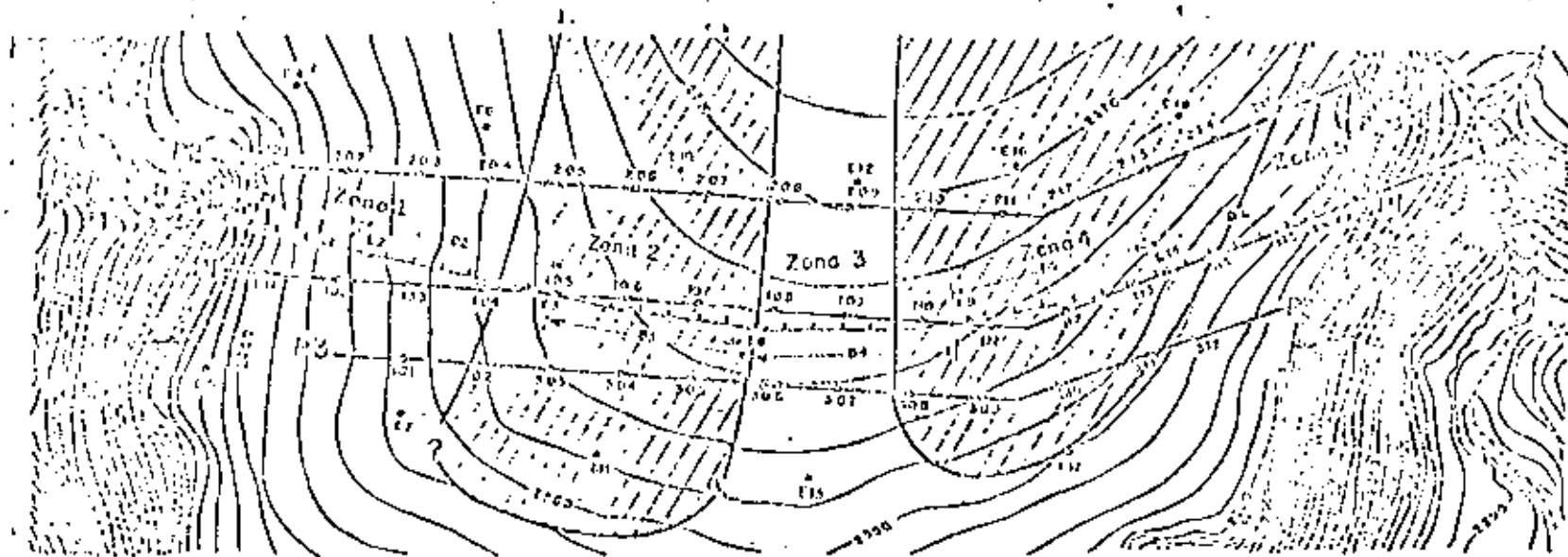
Esta obra se localiza en el Estado de Hidalgo, para el proyecto del nuevo FF - CC. México - Nuevo Laredo, en el kilómetro 117+300, con origen en Buenavista, D. F.

La finalidad del estudio es la de reunir la mayor información posible sobre los problemas geotécnicos que pueden presentarse en el momento de la ejecución de la futura obra.

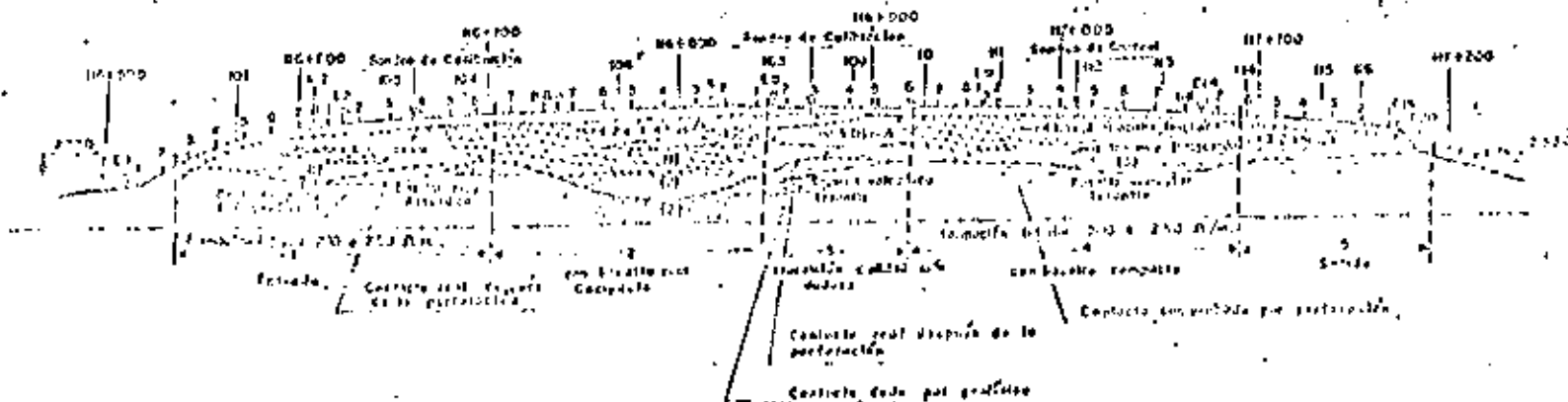
El túnel previsto se encuentra en un área cuya estructura geológica está constituida por coladas de basalto alternando con lobos volcánicos de diversos tipos. Esta futura obra tiene 460 m de largo con una sección prevista de 15 x 10 m y una cobertura máxima de 35 m.

La investigación geofísica se realizó empleando dos métodos: el

PLANTA



PERFIL DE RESULTADOS



ESTUDIO GEOFISICO PARA LA CONSTRUCCION DE UN TUNEL
(ETAPA : PROYECTO.)

Ejemplo: 5.1

sísmico de refracción y el eléctrico resistivo. Superpuestos al eje de línea, se ubicaron un perfil sísmico y otro eléctrico. Para completar lateralmente la información, se ubicaron en ambos lados del centro de línea y con separación de 60 m, un perfil eléctrico.

La prospección eléctrica se ejecutó, utilizando el dispositivo Wenner, a razón de un sondeo resistivo a cada 40 m, hasta una profundidad teórica de investigación de 100 m. La sísmica se desarrolló, colocando un geófono a cada 15 m y un punto de explosión a cada 110 m, a lo largo del eje. Además se situaron disparos (tipo abanico), en ambos lados del eje, para analizar la variación lateral sísmica.

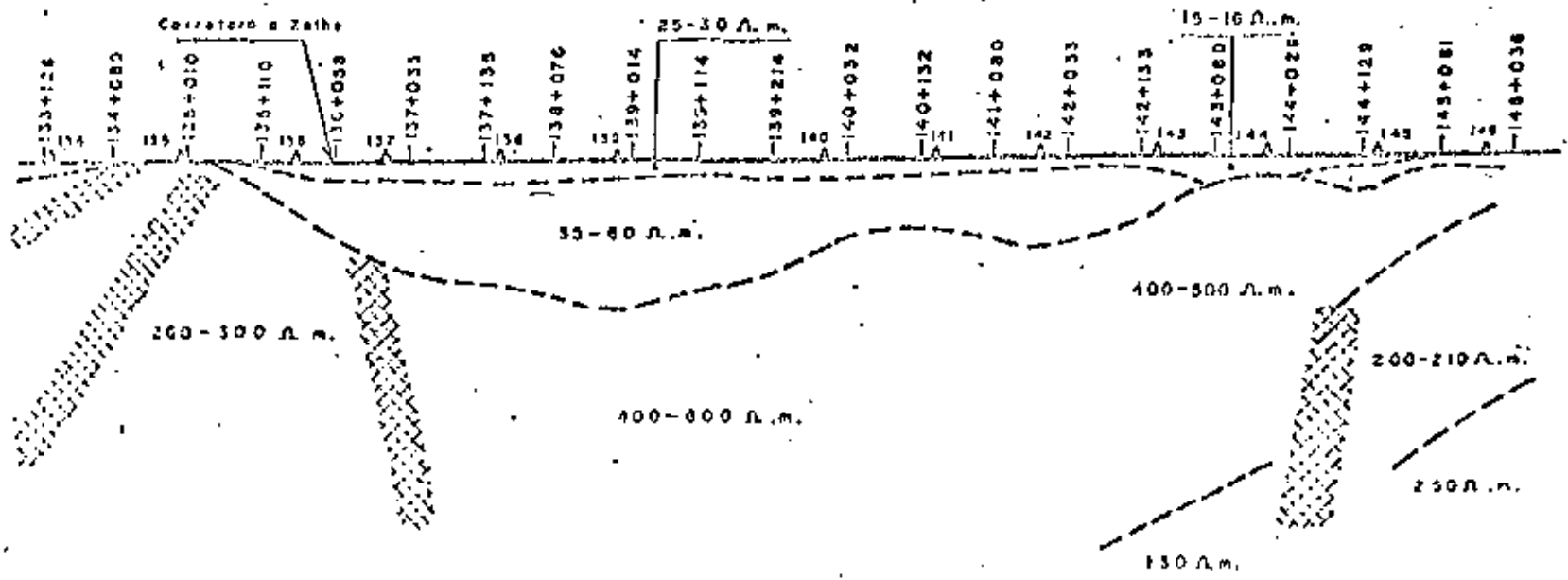
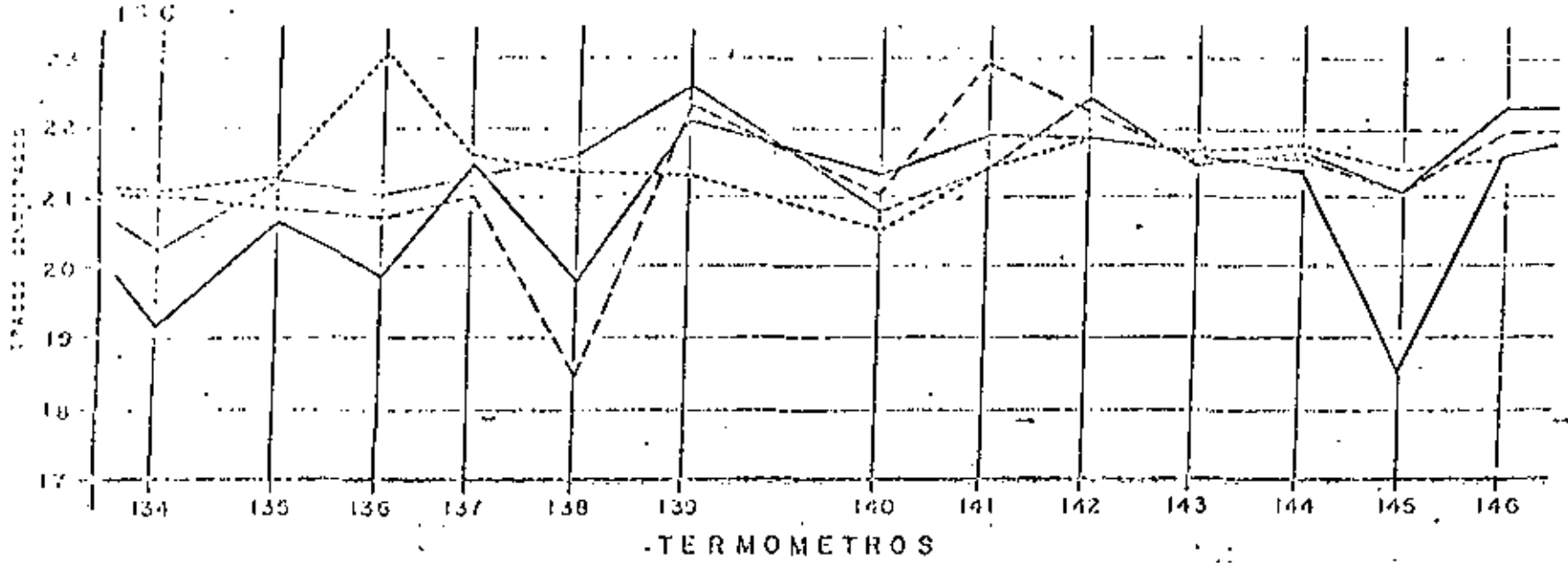
El resultado del estudio se ilustra en la figura correspondiente y para poder llegar al nivel de información deseada, se necesitaron de 900 mediciones resistivas y 280 sísmogramas.

5.2. - Estudio Empleando Dos Métodos:

Para resolver el problema planteado se utilizaron los métodos de termometría y de resistividad.

El área estudiada se localiza en el Estado de Hidalgo, en las cercanías del centro de población de Huichapan. En este lugar existe un manantial y el objeto de la investigación era de definir el lugar de paso, dentro de una formación basáltica próxima, del agua subterránea.

Una vez en posesión de la geología superficial se ubicó un perfil



ESTUDIO EMPLEANDO DOS METODOS GEOFISICOS DIFERENTES (ELECTRICA RESISTIVA Y TERMOMETRIA)

termométrico en una dirección transversal a la supuesta empleada por el agua subterránea. En el se colocaron termómetros a 4 m de profundidad, a razón de uno cada 150 m y se procedió a una primera serie de lecturas después de la estabilización de los aparatos.

Esta primera fase del estudio permitió delimitar las áreas en donde se debía realizar la campaña de sondeos eléctricos. Estos se ejecutaron a cada 100 m, hasta una profundidad teórica de 200 m y se empleó el sistema Wenner en el desplazamiento de los electrodos.

A continuación se realizaron cuatro series de mediciones de temperaturas, a intervalos de tiempo constantes (30 días).

En el plano adjunto se indican los resultados a que se llegaron. El diagrama superior indica la variación de temperatura, en cada punto, en función del tiempo, mientras que el inferior muestra la interpretación geoelectrica del mismo tramo de perfil. Se pueden observar las coincidencias de ambos métodos empleados.

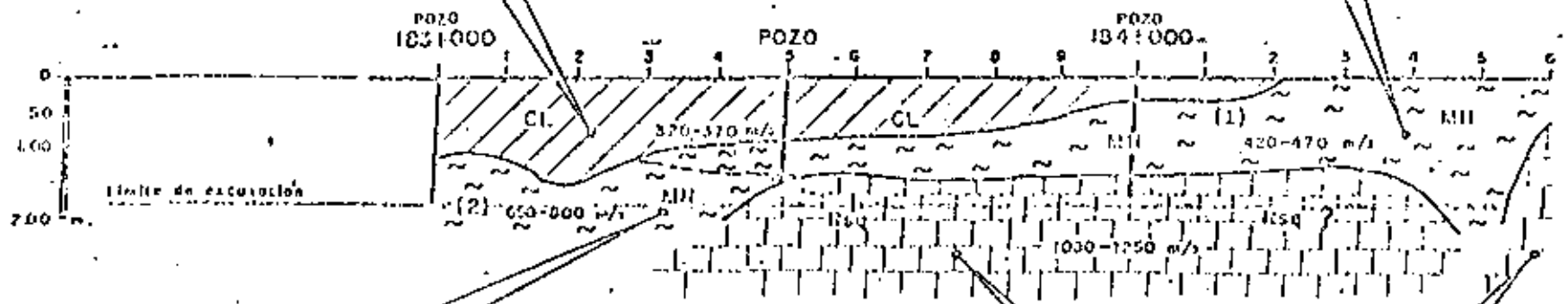
5.3.- Estudio Realizado a Poca Profundidad:

El estudio se localiza en el Estado de Nuevo León, cerca de la Ciudad de Monterrey. Su finalidad consistía en determinar las características de atacabilidad de los materiales que debían ser excavados por el alojamiento de una tubería de 24" de diámetro, a una profundidad de 1,80 m. La pretensión de tal investigación era de obtener la información necesaria

ESCALAS : H. 1 : 10.000
 V. 1 : 100

Este tipo de arena con 10% de arena fina, de mediana plasticidad, de color café oscuro y seco (CL)
 Clasificación: CO-20-00
 Ataque: Máquina retroexcavadora de uño con movimiento lateral o rotatorio.

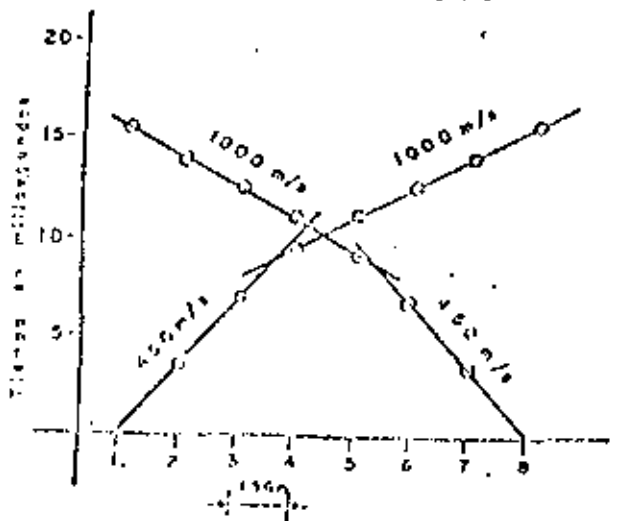
Este tipo de arena con 10% de arena fina, de mediana plasticidad, de color café claro y muy poco húmeda (ML)
 Clasificación: MO-20-00
 Ataque: Máquina retroexcavadora de uño con movimiento lateral o rotatorio al ser empujada por el tractor que avanza.



Este tipo de arena con 10% de arena fina, granos cohesivos de alta plasticidad, muy compacto, de color café claro y muy poco húmeda (MI)
 Clasificación: CO-40-00
 Ataque: Máquina retroexcavadora de uño con movimiento lateral.

Collas sueltas, de color gris claro (IG)
 Clasificación: OO-00-100
 Ataque: Martillo neumático

Dromogramas obtenidos en la Estación 184+300



EJEMPLO DE ESTUDIO GEOFISICO
 A POCA PROFUNDIDAD
 (microsismica convencional)

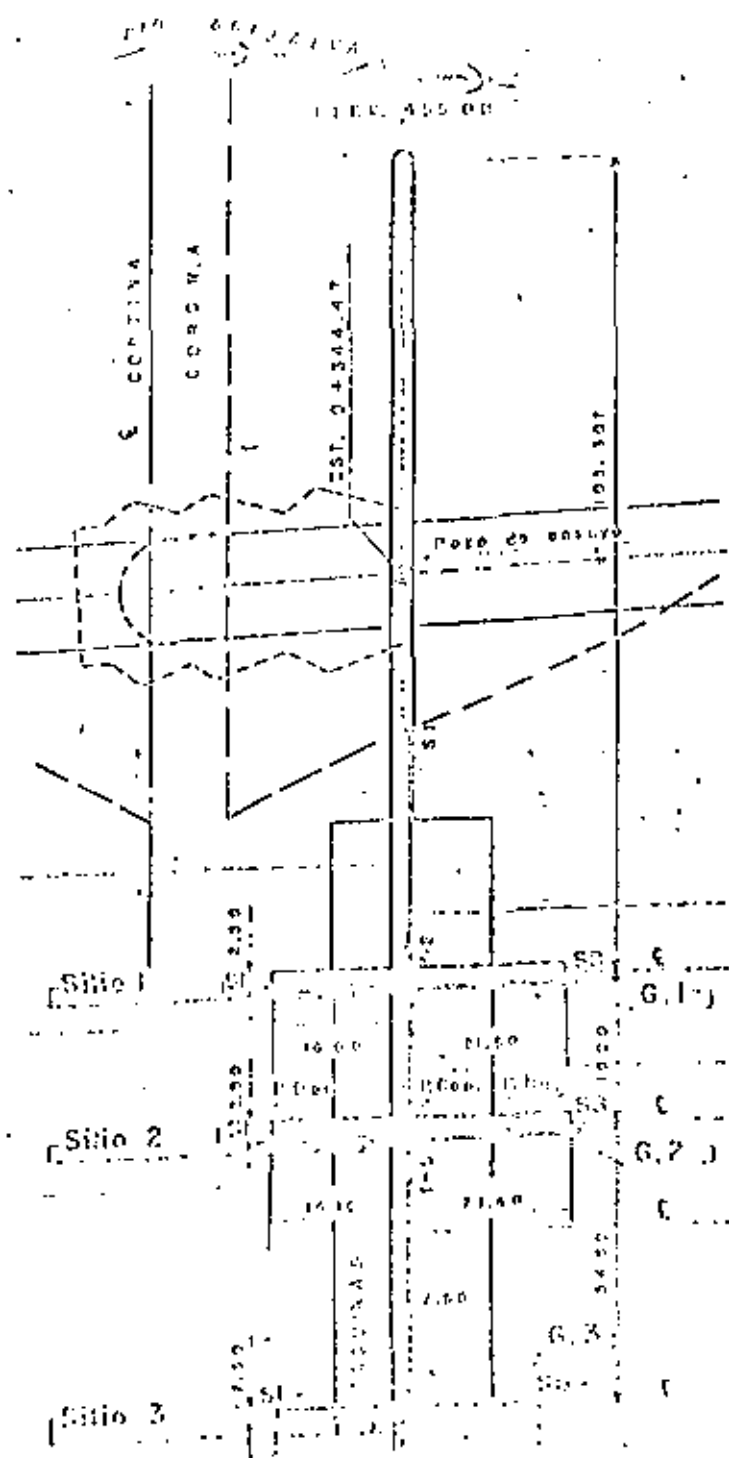
para poder evaluar racionalmente el presupuesto de dichas excavaciones y planear anticipadamente el equipo más adecuado para su ejecución.

El estudio se efectuó por medio del método microsísmico, con el fin de poder medir las velocidades de propagación de las ondas longitudinales a partir de un impacto mecánico. A lo largo del eje se ubicó una estación de investigación cada 100 m, en donde se realizaron las mediciones microsísmicas. Estas consistieron en la colocación de una serie de cológrafonos, espaciados 1.50 m entre sí; los sísmogramas se obtuvieron a partir de dos impactos mecánicos, situados en ambos lados del tendido, en el sentido del eje (impacto directo e inverso). La figura correspondiente indica los resultados a que se llegaron.

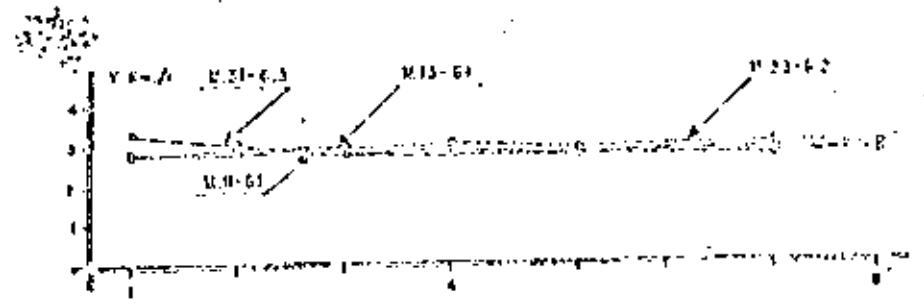
5.4. - Estudio Realizado en el Interior de un Macizo Rocoso.

El estudio se localiza en las galerías de instrumentación del aprovechamiento hidroeléctrico de la Angostura, Chis., situadas a la elevación 455, en el macizo rocoso de la margen derecha del río Grijalva. Es en este lugar que se construyó la sala de máquinas.

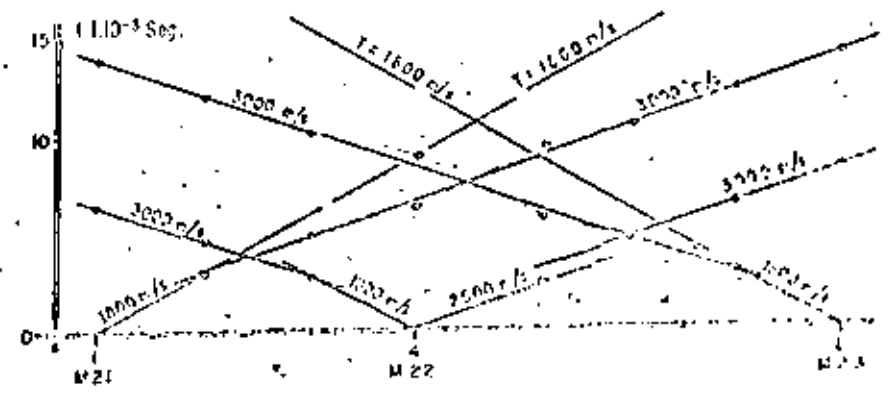
La finalidad del estudio era de medir, en aquel tiempo, las características dinámicas del macizo rocoso ya que la geología local pone de manifiesto condiciones muy especiales de estabilidad. En efecto, el macizo rocoso está constituido por capas de caliza pseudo - horizontales, con intercalaciones arcillosas. En consecuencia, se realizó una prospección



GALERIA G 2
 HODOGRAMAS



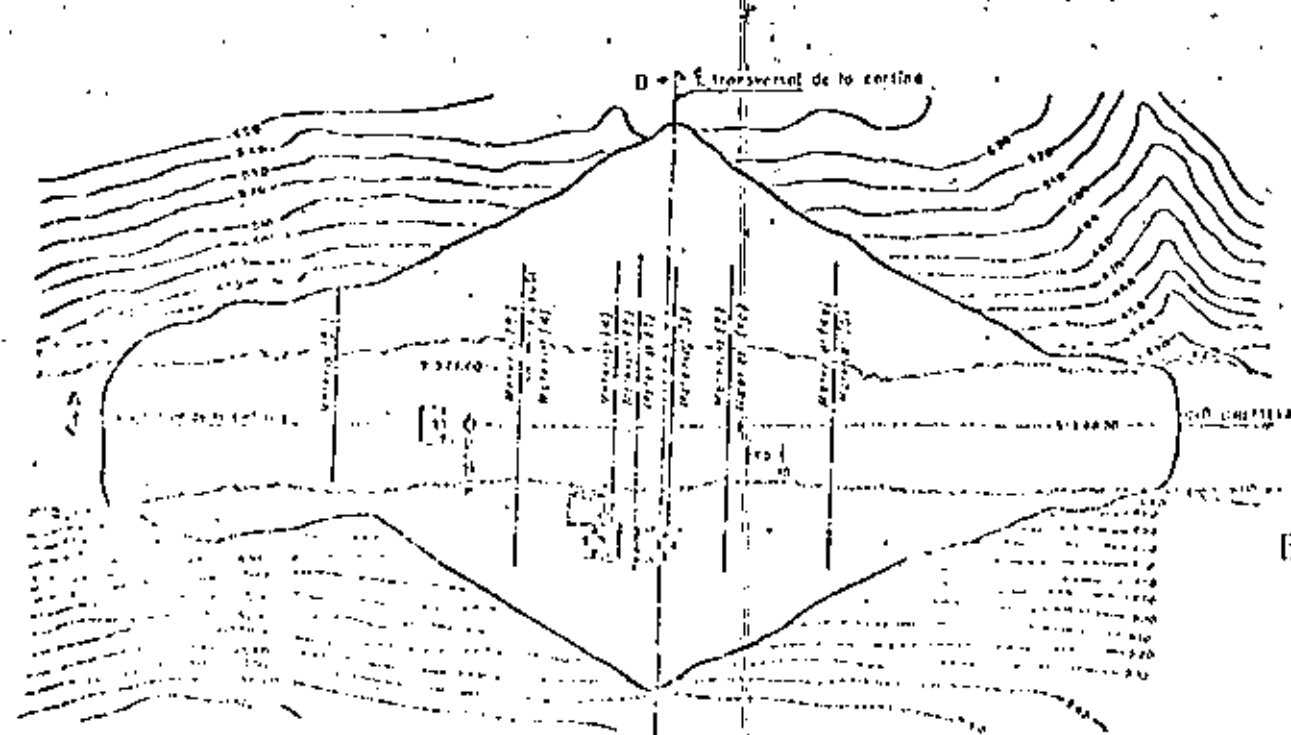
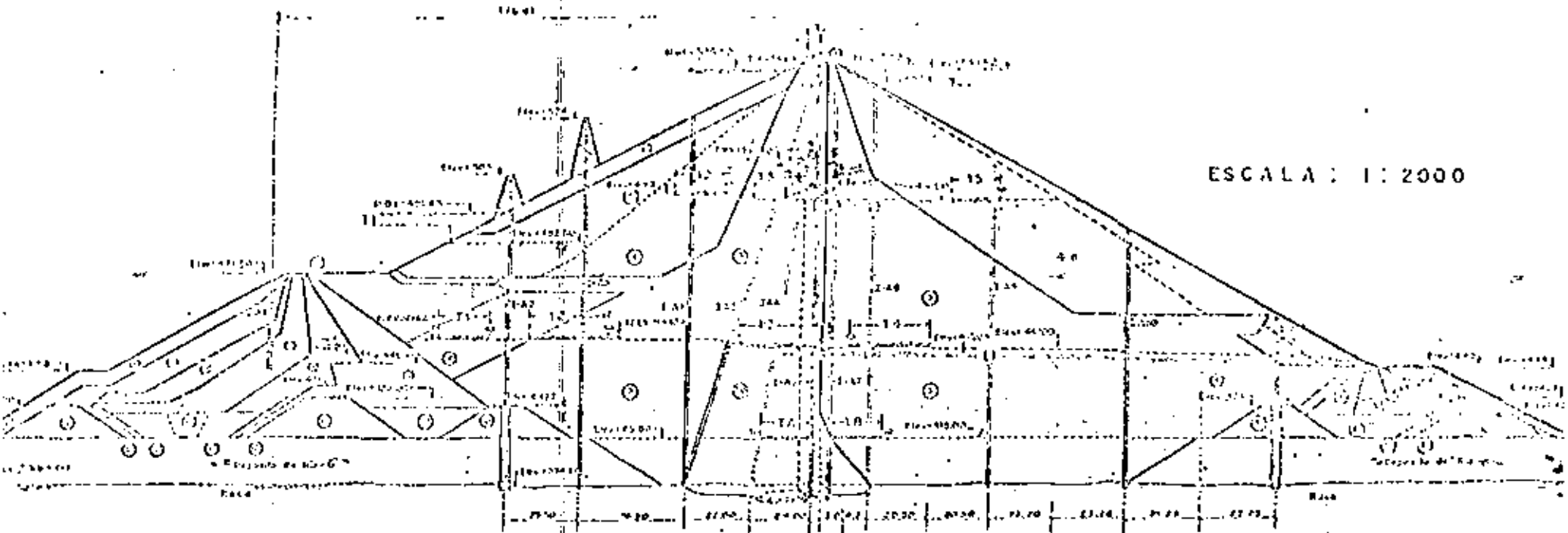
DROMOCRONICAS



ESCALA H. 1:400
 V. 1:400

ESTUDIO REALIZADO EN EL INTERIOR
 DE UN MACIZO ROCOSO.
 (microsísmico completo)

4.9 : 0120015



Tres series de mediciones
niveles : 415 - 447 - 496

PRESA LA ANGOSTURA, CHIS
ESTUDIO SISMOELASTICO DE LOS
MATERIALES DE LA CORTINA
(microsismico complejo)

microsísmica compleja, orientada a determinar ciertos parámetros en tres direcciones: paralelamente al río, perpendicularmente a él y verticalmente.

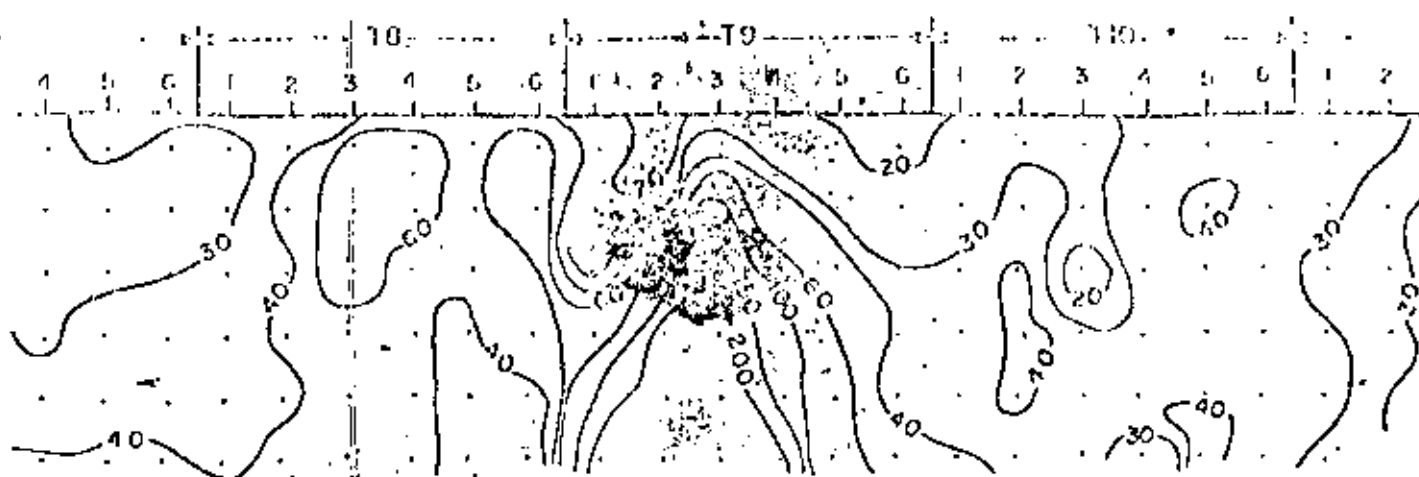
La parte izquierda de la figura correspondiente a este ejemplo, indica la ubicación de las mediciones realizadas y la derecha muestra unas dromocrónicas obtenidas en la galería G 2. El diagrama situado en la parte superior de las dromocrónicas corresponde a una transmisión sísmica lateral (hodogramas), a partir de las galerías G 1 y G 3 hacia la G 2, que se realizó a través del macizo rocoso (impactos en abanico).

5.5.- Estudio de los Materiales de una Presa:

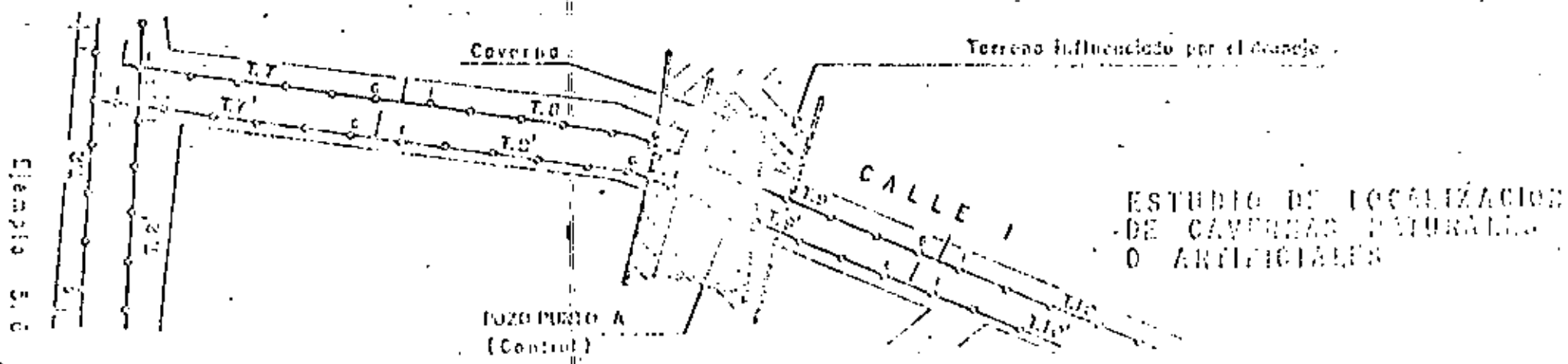
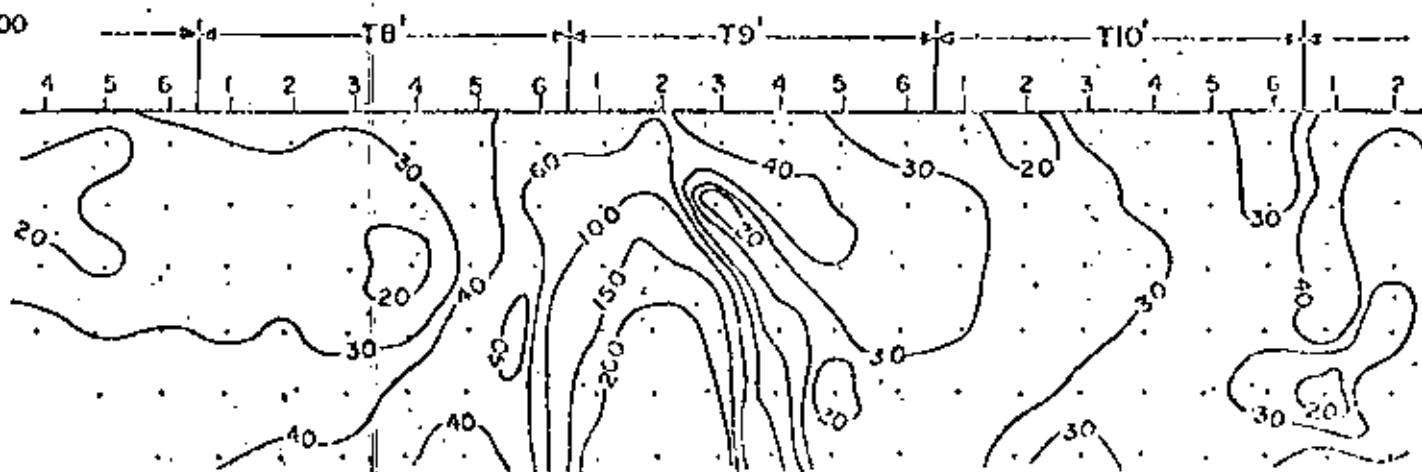
Se trata del estudio de los materiales de la cordina del proyecto hidroeléctrico de la Angostura, Chis., durante la etapa de construcción.

La finalidad de tal estudio era de obtener "in situ" los parámetros dinámicos tales como velocidad de transmisión de las ondas longitudinales y transversales, relación de Poisson y módulo elástico a diferentes niveles, en los materiales que se estaban utilizando en la construcción de la cordina.

El estudio se realizó por medio del método de refracción sísmica a pequeña escala (microsísmica compleja). Consistió en colocar los geófonos a distancias cortas (variables entre uno y dos metros) y dar en ambos lados del tendido unos impactos mecánicos.



ESCALAS: H. 1:500
V.



ESTUDIO DE LOCALIZACIÓN
DE CAVERNAS NATURALES
O ARTIFICIALES

La figura correspondiente al presente ejemplo, indica los materiales estudiados y los diferentes niveles en donde se realizó la investigación.

5.6.- Estudio de Localización de Cavernas Naturales o Artificiales:

El presente estudio considera el caso de una colonia de la delegación Alvaro Obregón., D. F. El estudio fue orientado a definir la posible existencia de oquedades o chimeneas en proceso de desprendimiento que podían producir hundimientos del terreno con riesgo para una futura urbanización.

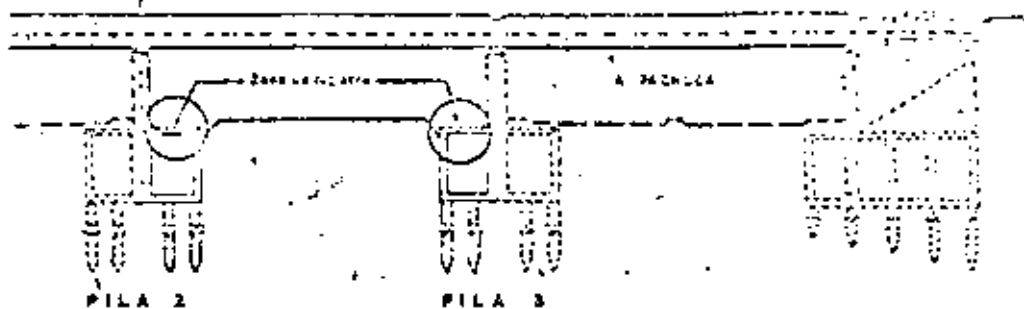
Para llevar a cabo esta investigación, se empleó el método eléctrico resistivo, con el tipo de arreglo de electrodos múltiples. Este método consiste en colocar una serie de electrodos de toma de tensión y medir, en cada intervalo, una diferencia de potencial a partir de dos electrodos de envío de corriente. Se establece, así, una verdadera red de puntos de medición, con un espaciamiento fijo y constante entre cada determinación de resistividad, tanto en el plano vertical como horizontal.

Los resultados obtenidos se exponen en la figura correspondiente.

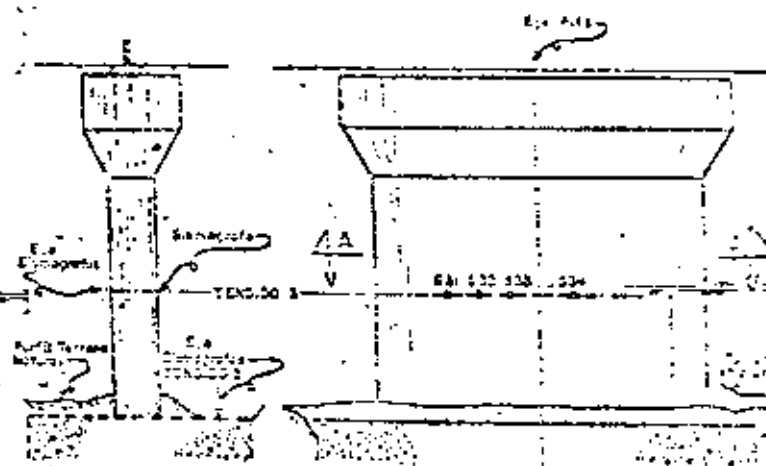
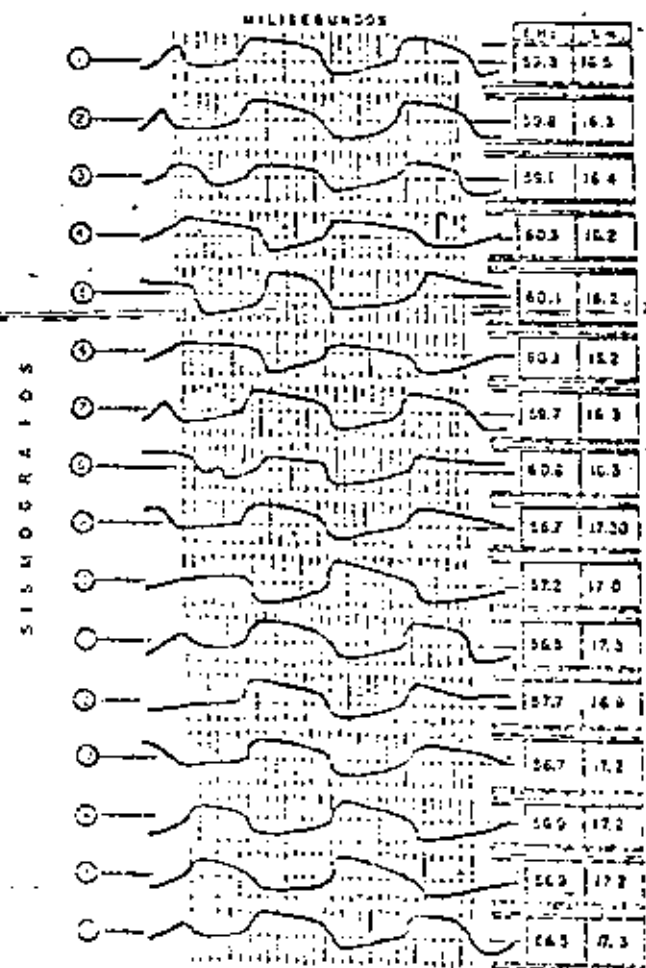
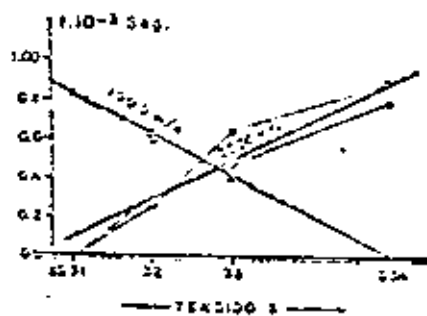
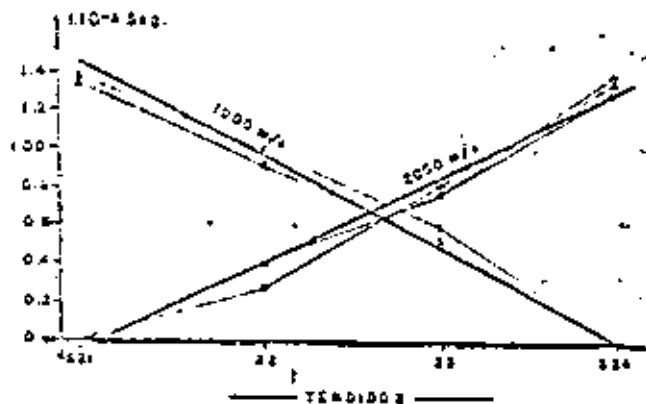
5.7.- Estudio Sismoelástico para Cimentación de Puente:

En este ejemplo se trata del estudio realizado para el control de la cimentación del puente Xalostoc, D. F., en el cruce de la vía de FF. CC. con la carretera México - Pachuca.

FUERTE EN RUEDA
ESQ. APROX. 11450

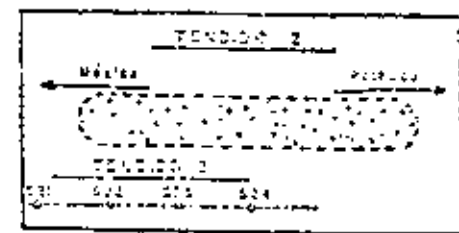


PILA CENTRAL
PUENTE XALOSTOC
Velocidad concreto 1980 m/a
ESCALA 1/40



MEDICION SOBRE CAMARON
CORTE A-A

ESCALA 1/100



Cuando se proyectó la ampliación de la capacidad del puente, era indispensable conocer el comportamiento de la cimentación de la pila central. Para poder lograr el objetivo fué necesario conocer con bastante seguridad la longitud de los pilotes de cimentación.

El método empleado consistió en enviar impulsos al pilote. Al ir variando la frecuencia de la señal, se alcanzó una frecuencia tal que se suman en fase los impulsos emitidos y reflejados en el extremo opuesto del pilote. En este momento se produce una resonancia tanto más grande cuanto menor es la absorción de energía por viscosidad interna o dinámica del material.

El diagrama obtenido depende de tres puntos: del sistema de excitación, del sistema de recepción así como de su liga con la estructura y de la estructura a identificar (forma, dimensiones, calidad del material). Para un modo operatorio definido y un receptor dado, el diagrama obtenido a través del sismograma será función de la estructura y de ella sola. Conociendo la frecuencia de resonancia del pilote y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas del material constitutivo, es fácil obtener su longitud.

En el ejemplo correspondiente a este caso, se exponen los resultados obtenidos.

5.8.- Estudio de Fugas de Agua por Medio de Trazadores:

El presente ejemplo trata del vaso de la presa "Las Alazanas",

ubicada sobre el río Soto La Marina, en el Estado de Tamaulipas.

El vaso de la presa, de 30 km de longitud, alojado en una región calcárea y con capacidad de almacenamiento de 30 millones de metros cúbicos, presenta fugas de agua que varían entre 5 y 10 m³/seg. A unos ocho kilómetros aguas abajo de la cortina, existen manantiales cuyo gasto aumenta conforme se eleva el nivel del agua del embalse.

La finalidad del estudio era de verificar la conexión entre los diferentes manantiales y localizar las zonas de infiltración en el vaso. Para resolver el caso se empleó el método de los trazadores y se procedió de la forma siguiente:

Inicialmente se inyectaron diez diferentes trazadores (uno reactivo y nueve inertes, no absorbibles en el medio poroso) en diez zonas del fondo del vaso, con el objeto de delimitar áreas de estudio en el caso de que éstos aparecieran en los manantiales existentes aguas abajo de la cortina. En los análisis de las muestras de los manantiales se encontraron tres de los trazadores, pero su forma de aparición en el tiempo dio lugar a incertidumbre, dada la dificultad de su interpretación.

Posteriormente se rastrearon las corrientes, en el vaso, inducidas en las fugas, marcándolas con el trazador radiactivo oro 193 en forma de ácido cloráurico, material absorbible por el medio poroso. Se realizaron 50 inyecciones de dicho trazador a lo largo del vaso, a profundidades variables y cercanas al fondo. El rastreo se efectuó desde una lancha

1. Línea de contorno
 2. Línea de inyección
 3. Línea de fuga
 4. Línea de escape
 5. Línea de escape
 6. Línea de escape
 7. Línea de escape
 8. Línea de escape
 9. Línea de escape
 10. Línea de escape

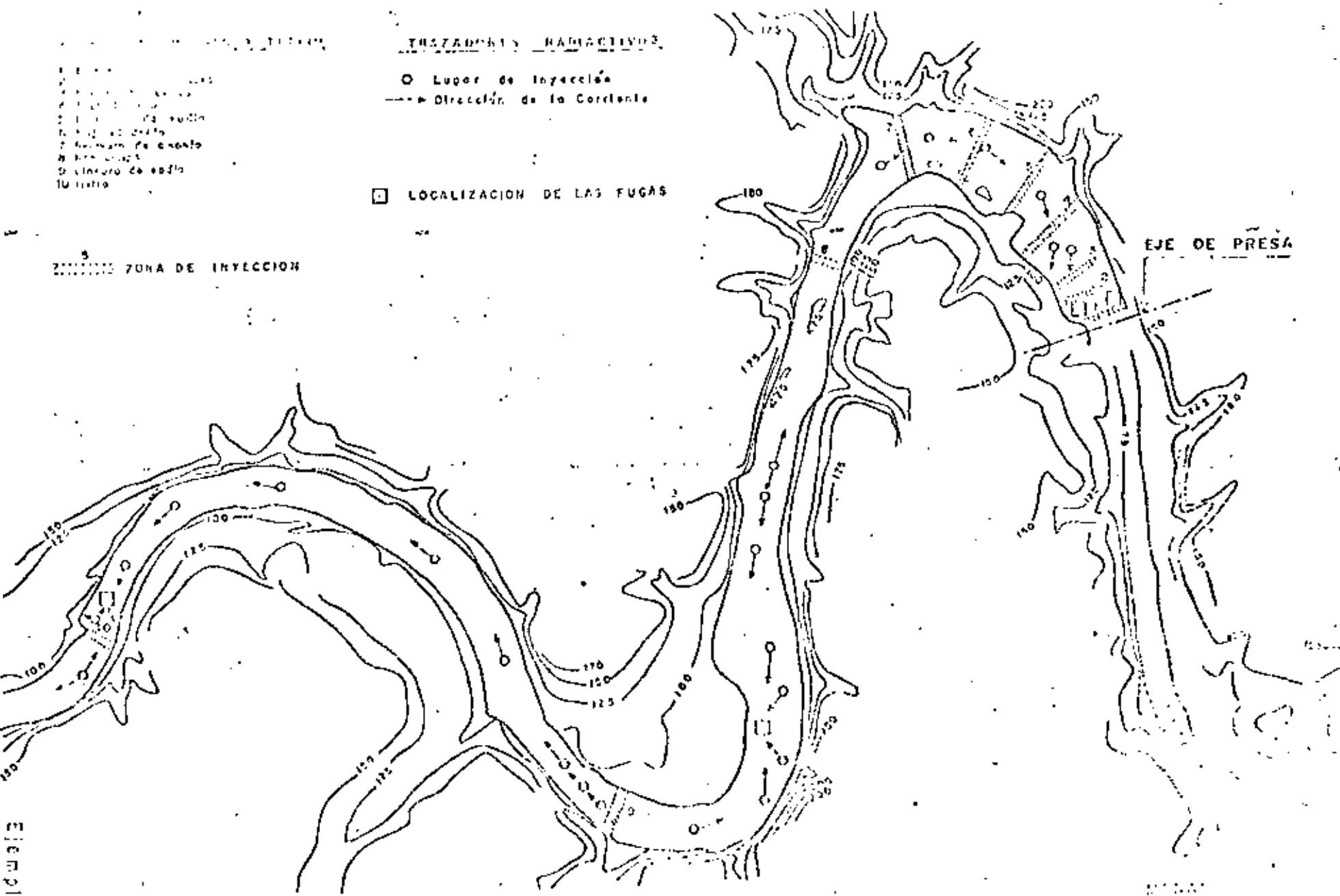
TRAZADOS Y RADIACIONES

○ Lugar de inyección
 - - - Dirección de la corriente

□ LOCALIZACION DE LAS FUGAS

ZONA DE INYECCION

EJE DE PRESA



Ejemplo: 5.2

acondicionada con tres detectores de radiaciones, fueron llevados a diferentes profundidades. Se lograron, así, localizar cinco sitios de infiltración, además de las áreas de influencia de cada una de ellas. A tres de ellas se muestró el fondo por medio de un buzo que llevaba el trazador, comprobándose la fijación del trazador.

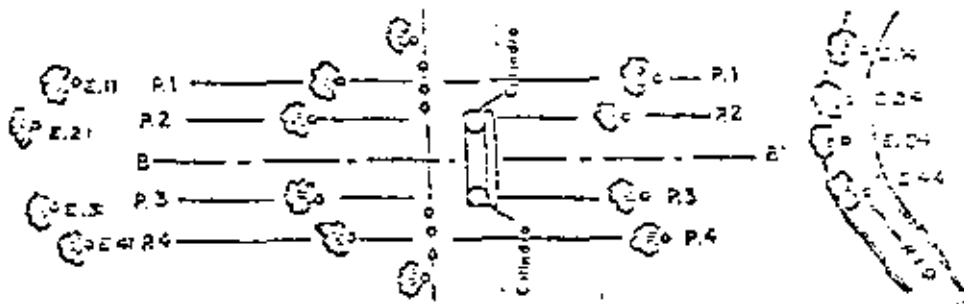
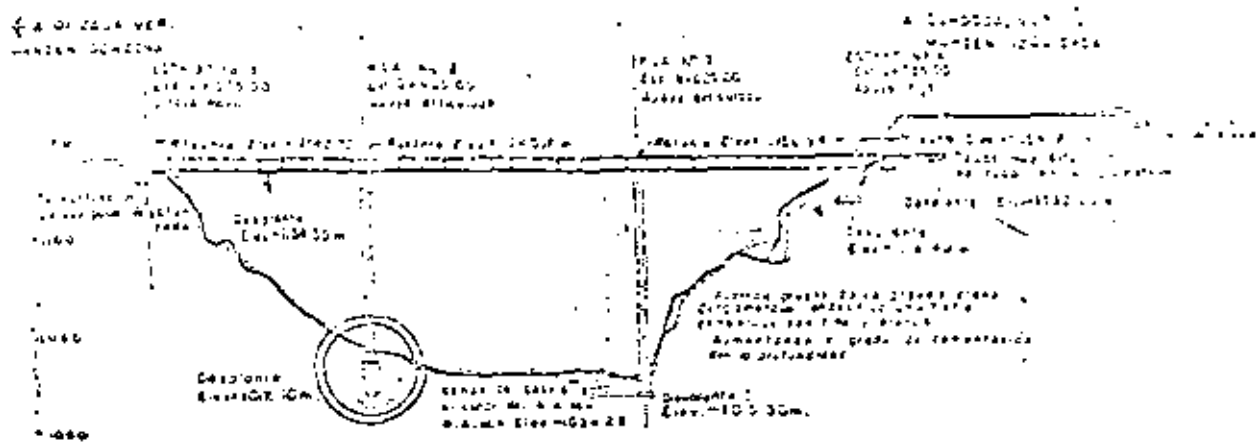
Determinados los sitios de filtración por medio de los trazadores radiactivos, se procedió a vaciar el vaso con el fin de conocer las características y tipo de material superficial y subyacente en cada uno de ellos.

Después de hacer un minucioso reconocimiento de los sitios de infiltración, se realizó un estudio de sísmica - refracción para determinar los espesores y tipo de material que cubren esos sitios que permitirán establecer el tipo de tratamiento de terreno que conviene para disminuir la infiltración.

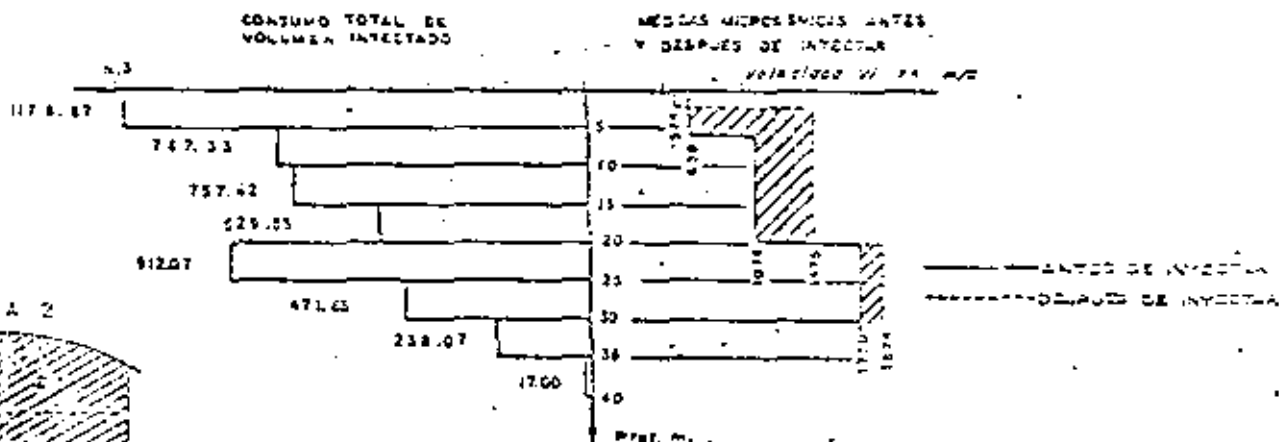
Los resultados se exponen en la figura correspondiente.

5.9.- Estudio de Consolidación de Terreno:

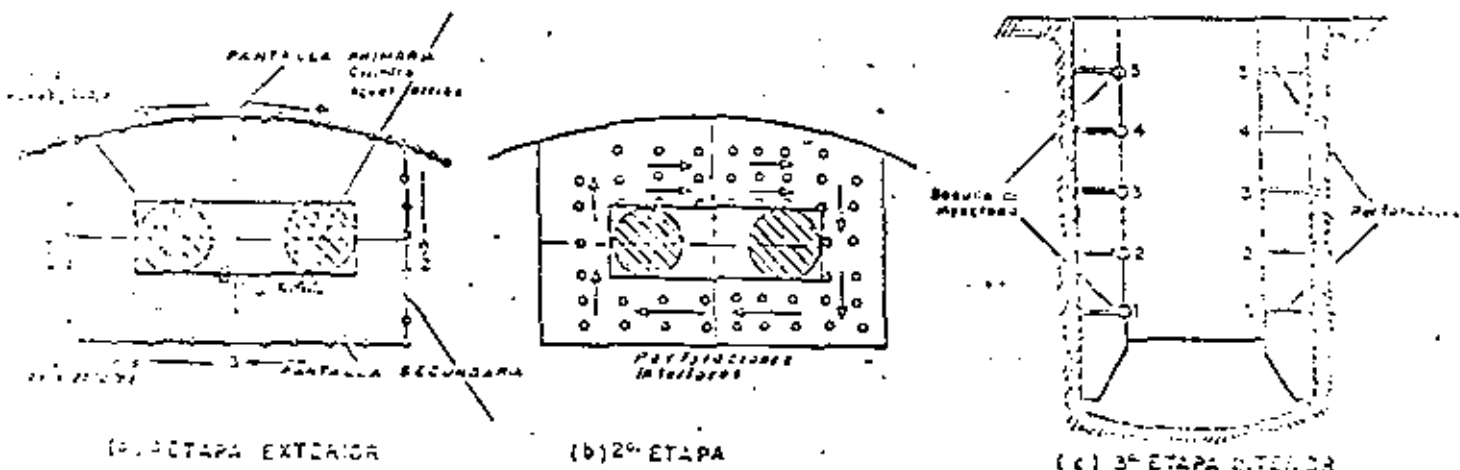
El puente Mariano García Sela, construido para la autopista --- Orizaba - Córdoba, presentó, en su cruce sobre la barranca Medio, problemas en su cimentación por la elevada Karsticidad de la formación en las laderas. El asegurar la estabilidad contra deslizamientos de las taludes en la zona Kárstica y de la cimentación del puente ante cargas y movimientos horizontales, en especial en la pila No. 2, según se muestra en ---



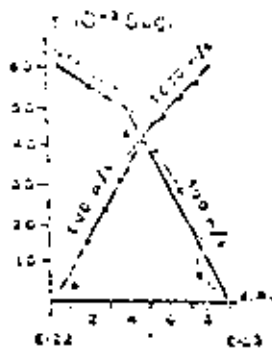
DISPOSICION DE LOS TENDIDOS DENTRO DE LA ZONA DE LA PILA 2



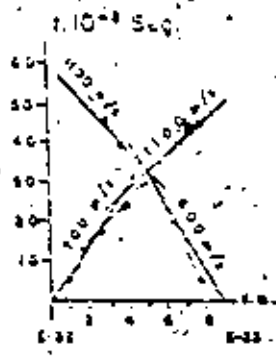
CONSUMO TOTAL DE INYECCION CON LECHADA CEMENTO-PUZOCANA



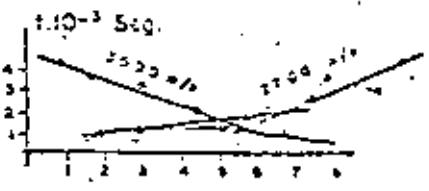
PROCESO DE INYECTADO EN PILA 2



Tendido P2

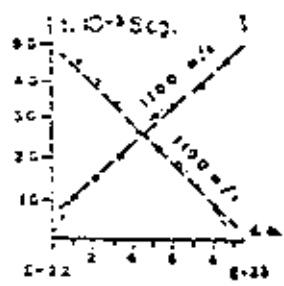


Tendido P3

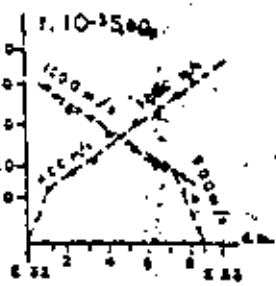


Tendido eje Long. del Cilindro

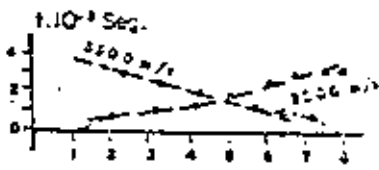
DROMOCRONICAS ANTES DE LA INYECCION



Tendido P2

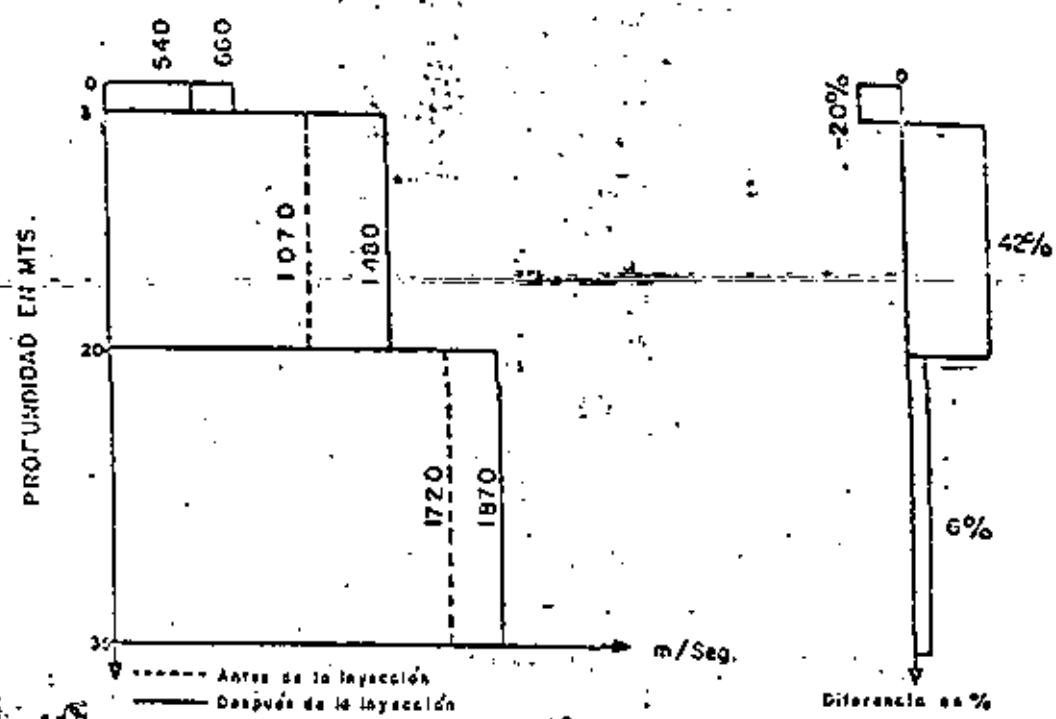


Tendido P3



Tendido eje Long. del Cilindro

DROMOCRONICAS DESPUES DE LA INYECCION



VARIACION DE LAS VELOCIDADES DE PROPAGACION CON LA PROFUNDIDAD.

inyecciones del tipo cemento - puzolana y a verificar el grado de efectividad de dicha inyección en la consolidación, sellado y rigidez de la roca, para lo cual se utilizó, entre otros el método microsísmico.

La técnica utilizada para definir las características de porosidad, de discontinuidad y de rigidez en la formación rocosa, tanto antes del inyectado como después de él, fue planeada y ejecutada, colocando tanómetros sísmicos dentro y fuera de los cilindros de cimentación correspondientes a la pila No. 2, cuyas características se enseñan en las figuras correspondientes.

En estas mismas figuras, se puede apreciar la forma de proceder para el inyectado y los resultados a que se llegaron.

6.- COMENTARIOS SOBRE EL EMPLEO DE LA GEOFÍSICA:

La geofísica aplicada es un valioso auxiliar para los estudios de campo, en cuanto que abastece de información sobre las características físicas de los materiales que componen el subsuelo. Es, entonces, una aplicación de ciencias básicas, como son la física, la química o las matemáticas, ya que los principios en que la prospección cimenta su aplicación provienen de conceptos básicos.

Los conceptos teóricos que se manejan, en general, consideran ciertas características de homogeneidad, isomorfismo, etc., que no siempre están presentes en los materiales que constituyen el terreno a explorar. Sin embargo, es la pericia del interprete de los datos la que nos --

llevará a transformar los números a condiciones geológicas de utilidad. - No debemos olvidar que, a nivel de aplicación, es necesario que los conceptos básicos encuentren una forma práctica de manifestación.

A continuación se indica una tabla orientativa para la elección del método geofísico en función de la etapa en que se encuentra una obra.





centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS

DE AGUA SUBTERRANEA

TECNICAS DE PERFORACION

Ing. Augusto César Lara Vázquez



II. TECNICAS DE PERFORACION.
Por: Ing. Augusto César Lara Vázquez.

1.- BREVE RESEÑA HISTORICA DE LA PERFORACION.

Las más antiguas referencias datan del año 256 A.C. en que los chinos usaban un procedimiento rudimentario para la construcción de pozos de agua. Sus métodos poco han cambiado en los 23 siglos que siguieron, pero ellos fueron los que permitieron el desarrollo de las técnicas de perforación esparcidas por el resto del mundo.

En 1859 se logra perforar con éxito el primer pozo para producir petróleo en Pennsylvania, obra que descubre una fuente de energía que viene a revolucionar el modo de vida del hombre moderno, capacitándolo para producir trabajo por medio de la quema de combustible, transformando la potencia del músculo a la potencia de la máquina, originando con esto un período sin precedentes en el desarrollo económico e industrial.

Sweeney en 1866 aplica su sistema de rotación, acondicionada con fuerza externa para mecanizar la perforación y a partir de aquí, paulatinamente aparecen técnicas y herramientas que se han venido ampliando y modificando hasta nuestros días.

2.- CLASIFICACION DE LOS METODOS DE PERFORACION.

La ejecución de un sondeo se puede lograr empleando las herramientas adecuadas, cuya acción produce la perforación de las rocas, a cada una de estas corresponde un procedimiento. Contrariamente a lo que se podría pensar, no existe un método universal y siempre es preciso elegir uno adaptado al resultado que se busca. Por ejemplo, un sondeo de reconocimiento no se realizará siempre con un procedimiento

que consiga necesariamente grandes rendimientos con el decrecimiento de la calidad del reconocimiento, sino con un método que permita la buena testificación de las formaciones y un estudio correcto del subsuelo; por el contrario, la herramienta debe permitir siempre una velocidad de avance casi instantáneo.

La elección del procedimiento depende no solo del fin que se persigue, sino también de la naturaleza de las formaciones por atravesar y el arte del perforador consiste en elegir el procedimiento que mejor se adapte.

Los métodos usados para la construcción de pozos pueden clasificarse en dos grupos, estos se llaman de Percusión y Rotatorios, pudiendo clasificar con más detalle los diferentes sistemas y tipos de equipos de cada uno de estos grupos generales como sigue:

I. METODOS DE PERCUSION.

- A. Sistemas de perforación con cable.
- B. Sistemas de varilla o cable rígido.

II. METODOS ROTATORIOS.

Dependiendo del sistema del control de alimentación:

- A. Equipos mecánicos
- B. Equipos Hidráulicos.
- C. Equipos de perforación con diamante.

Además de ésta clasificación inicial, se puede establecer un tercer grupo, en el que las características de los primeros se aplican a la perforación y este grupo sería:

III. METODOS COMBINADOS.

- A. Equipos capaces de emplear cable o rotatorio según el caso.
- B. Equipos con sistema común de circulación que utiliza herra-

mientas de percusión y un sistema de eliminación de recortes, como el que se usa actualmente en la perforación.

2.1.A. SISTEMA DE PERCUSION CON CABLE.

El equipo de perforación con cable típico, consta de las siguientes partes principales:

- a) Una estructura que aloja todo el sistema de transmisión y aplicación de fuerza.
- b) La torre, una estructura piramidal, alta y cuadrada, erigida directamente sobre el sitio escogido para el pozo.
- c) Herramienta de ataque, compuesta por barrenas, rimas ó ampliadores, elementos de peso ó vástago y percusor ó tijeras.
- d) Utencilios para la extracción del recorte, como son las cucharas ó achicadores.

La maniobra consiste en un movimiento continuo recíprocante de la herramienta de ataque, con el objeto de cincelar la formación para ir labrando el hueco. El progreso depende de la aptitud del perforista para interpretar las vibraciones que recibe al tocar con la mano el cable de perforación. El novato a veces "Pierde el Ritmo" y trabaja sin lograr avance, pudiendo estar la herramienta apoyada en el fondo, mientras él juega con el tirante del cable ó puede estar columpándose metros -- arriba del fondo. La sacudida que el perforador siente en el cable, es el resultado de la acción alternada de soltar y aplicar tensión al cable, provocada por el balanceo y el impacto de la barrena en el piso de la formación atacada.

El impacto de las pesadas herramientas en el fondo del pozo cuando éstas caen libremente, es enorme y se repite varias veces por minuto, por lo que debemos tratar con una fuerza de trituración de considerable magnitud, sobre un área tan pequeña.

(Fig. No. 1)

Este sistema es de transmisión directa del impacto a la formación, un ejemplo para ilustrar el sistema, sería el muestreador Shelly, al cual se golpea con un martillo de peso conocido y carrera constante, al final se cuenta el número de golpes y la penetración realizada, determinándose con ello el grado de compactación del terreno. Es usado para la extracción de muestras inalteradas, útiles para el laboratorio de mecánica de suelos. (Fig. No. 2)

El sistema de perforar con percusión, es el más antiguo y aún se encuentra en uso, observándose algunos de estos equipos en varias regiones de nuestro país.

Ventajas de los equipos de percusión:

1. Efectivo para formaciones duras
2. Muestreo confiable de las formaciones y sus cualidades de agua.
3. Registro independiente de los niveles de agua alcanzados.
4. No requiere de volúmenes excesivos de agua.
5. Equipo práctico y maniobrable.
6. Mantenimiento económico y no necesita personal muy especializado.

Desventajas:

1. Bajo rendimiento a profundidad.
2. Verticalidad y diámetro relativos a las formaciones.
3. Calidad del ranurado del ademe colocado, menor que los prefabricados.
4. Ademe perdido si el sitio no resulta favorable.
5. Baja velocidad de penetración en acarrees o formaciones no consolidadas.

2.II.A. EQUIPO ROTATORIO MECANICAMENTE CONTROLADO.

En resumen se puede clasificar a éste sistema en las siguientes partes según sus funciones:

- a) La torre como estructura de soporte.
- b) Equipo de fuerza y mecanismos de transmisión.
- c) Aparejos del elevador.
- d) Elementos rotatorios.
- e) Sistemas de circulación.

En cualquier tratado de las características de perforación rotaria, se deben de dar cuenta que existen variaciones considerables en el detalle estructural y por supuesto, diferencias importantes en su tamaño y peso de las partes componentes de acuerdo con la profundidad por alcanzar; así como los mejoramientos progresivos y nuevos elementos, que son el resultado obtenido y necesidades que se presentan a través de las perforaciones realizadas.

De acuerdo con la clasificación funcional sugerida los dos primeros elementos resultan fáciles de comprender su funcionamiento y por tal motivo comenzaré por el tercero ó sea el "c", que con los implementos para la elevación, equipo usado para soportar la columna de perforación y otras cargas pesadas en la torre. Este incluye, el malacate, polea de la corona, polea viajera y el cable elevador. (Fig. No. 3.6)

El malacate. Este sirve como centro de control de fuerza para el conjunto elevador y para los elementos rotatorios de la columna de perforación.

La polea de la Corona. Colocada en la parte más alta de la torre, debe ser capaz de soportar la carga máxima que pueda suspenderse de la polea viajera, así como el

peso muerto de los demás elementos de levante.

06

La Polea Viajera.- Tiene la doble función de soportar la columna de perforación y las maniobras de sacar o meter la tubería, también se usa para colocar el ademe en el pozo.

d) Elementos Rotatorios.

Los elementos rotatorios son: la mesa rotaria, el gancho giratorio, columna de perforación que incluye al vástago (Kelly), lastrabarrena (Drill Collar's) y la barrena. Cada uno de ellos tiene su función particular así como, problemas específicos de diseño y selección.

La Mesa Rotaria.- La mesa rotaria sirve para sujetar y hacer girar el vástago, al mismo tiempo permite que resbale a través de ella, soportar la columna de perforación en el pozo cuando está suspendida en posición estacionaria.

La Unión Giratoria. Es el medio para forzar al fluido de perforación de las conexiones de la bomba a la columna y soportar el peso de la misma, mientras gira.

La columna de Perforación.- Esta debe ser elástica, capaz de transmitir la torsión a la barrena, también debe suministrar un conducto cerrado para el flujo del lodo de perforación, así como de ayuda a la formación de paredes en el pozo cuando se usa lodo.

El Lastrabarrena. El lastrabarrena ó Drill Collar's se le ha asignado el desempeño el desempeño de concentrar peso cerca del extremo de la columna de perforación, para evitar torsiones y estabiliza el movimiento de la columna, cuando se opera a presión

en la barrena; otra función es la de asegurar la verticalidad del pozo.

07

Vástago Giratorio de Transmisión o "Kelly". Para que la mesa rotaria tenga un -- agarre firme con la columna de modo que gire con ella, cuenta con esta pieza de -- varios tipos y formas de diseño para montarse en una abertura similar con que -- cuenta la mesa y poder transmitir sus esfuerzos a la herramienta de ataque.

La Barrena.- Es el punto central de todo el equipo de perforación y se encuentra instalada en el extremo inferior de la columna. Desintegra la formación en su rotación, debido a la presión que le imprime la columna.

Se usan varios tipos de barrenas y su selección depende de las características de la roca por penetrar y de la preferencia del perforista. Entre más dura y tenaz es la formación, más pequeños van siendo los dientes ó tamaño de los elementos cortantes. Además en su construcción tienen una tobera ó chiflón que va limpiando a presión, cualquier adherencia en los dientes y consta de tres conos o roles en diferente posición y maquinado del diente, para romper y triturar la roca.

e) El Sistema Circularotio.

La función principal de este sistema consiste en forzar al fluido de perforación y regresarlo a la superficie, logrando con esto la extracción del material recortado. Sus elementos esenciales son: las bombas de lodo, líneas, cabezales de succión y descarga, así como la manguera giratoria y presa de lodos.

La circulación del lodo de perforación o del fluido que lo reemplaza, se puede hacer de dos maneras:

Circulación Directa e Inversa.

Circulación Directa.- La bomba inyecta el fluido por el interior de la tubería de perforación que mueve a la barrena, al llegar al fondo, cambia de dirección y asciende por el espacio anular, entre la tubería y la pared del pozo, arrastrando consigo al recorte que se produce durante la perforación, después en la superficie es conducido por un canal y lugares de decantación, para que de ahí sea aspirado por la bomba y nuevamente comience su recorrido. (Fig. No. 4).

Circulación Inversa. Este invierte el sentido de dirección del lodo, es decir, se inyecta el fluido por el espacio anular y es transportado por el interior de la tubería de perforación, trayendo consigo los recortes producidos. (Fig. No. 5)

2.II.B. EQUIPO ROTATORIO HIDRAULICAMENTE-CONTROLADO.

Estos equipos son semejantes al anterior y la diferencia estriba en que la presión ejercida a la barrena, se aplica desde la superficie por medio de "Gatos Hidráulicos" (Pull Down), el resto del equipo y herramienta es igual y en algunos casos varía de acuerdo con el objetivo que se persigue. (Fig. No. 6)

2.II.C. EQUIPOS DE PERFORACION CON DIAMANTE.

Los equipos de perforación con diamante en su mayoría son equipos hidráulicamente controlados, es decir la presión sobre la herramienta de ataque se ejerce desde arriba y la variación consiste en el uso de brocas de diamante.

La elección de este material para perforar, viene justificado por su dureza en la escala de Mohs y existe por lo consiguiente, un verdadero interés en su uso para rocas silíceas o abrasivas. Donde la velocidad de rotación es mayor que las barrenas convencionales, resultando con esto de mayor avance en la perforación.

La perforación con diamante ha desarrollado un nuevo sistema, que permite extraer la muestra del subsuelo, sin necesidad de extraer la sarta de perforación, denominado "Sistema Wire-Line" y consiste de un barril de longitud convencional de doble tubo, el exterior que contiene la broca de diamante y la rima que asegura el diámetro del agujero, todo este conectado a la tubería de perforación. El tubo interior que permite el acceso del material recortado, al llenarse es extraído a la superficie por el interior de la tubería de perforación, por medio de una herramienta especial "Pescador" que está conectado a un cable, movido por medio de un malacate, una vez que sale a la superficie se extrae la muestra y nuevamente se envía a la profundidad donde se encuentra el barril y así poder continuar con la perforación (Fig. No. 7).

El uso del diamante en la perforación se emplea muy a menudo en la exploración minera, en la actualidad se le ha venido utilizando en los trabajos de investigación del subsuelo, donde es preciso contar con una muestra en la que no se alteren sus condiciones con las que se encontraba, así como en las determinaciones geohidrológicas, hidrogeoquímicas en la cuantificación y estudio de las aguas subterráneas y localización de hidrocarburos, debido a su bajo costo, evitando con este sistema la necesidad de construir pozos exploratorios de mayor diámetro, que por lo general incrementa la inversión en la exploración.

Ventajas de ambos equipos:

Mecánica e hidráulicamente controlados.

- 1) Cierta efectividad para material duro.
- 2) Alto rendimiento a profundidad
- 3) Verticalidad dependiente de herramienta usada.
- 4) El ademe no se pierde si el pozo no es productivo
- 5) Un registro eléctrico que define las condiciones de las

formaciones.

- 6) Uso de lodo de perforaciones para formaciones no consolidadas y análisis del laboratorio.
- 7) Alta velocidad de penetración en acarrees.
- 8) Variedad de diámetros de perforación.

Desventajas:

- 1) Muestreo no muy confiable y sus calidades de agua.
- 2) Requiere de volúmenes de agua.
- 3) Equipo pesado y difícil de ser transportado en ciertos lugares.
- 4) Mantenimiento costoso y se necesita personal especializado.
- 5) Depende del buen uso del lodo de perforación e interpretación de los registros eléctricos, además del conocimiento práctico de la herramienta utilizada.
- ~~6) Es necesario contar con los resultados del laboratorio en corto tiempo para el diseño del pozo.~~

Ventaja de la perforación de diamante.

- 1) Efectivo para material duro.
- 2) Ademe rescatable al terminar el pozo.
- 3) Se le puede correr un registro eléctrico.
- 4) Muestreo muy confiable de la formación y sus calidades de agua.
- 5) Equipo práctico, manobrable y ligero.
- 6) Bajo costo de perforación.
- 7) No requiere de volúmenes excesivos de agua.
- 8) Muy adaptable a los sistemas.

Desventajas:

- 1) Bajo rendimiento a profundidad.
- 2) Verticalidad no confiable
- 3) Se necesita personal capacitado en el manejo de la herramienta de diamante.
- 4) Muy débil su tubería de perforación a la torsión.
- 5) No se puede ejercer mucho "jalón" a la tubería.
- 6) Torre y bombas no muy capaces y dependientes de la herramienta utilizada.

III. METODO COMBINADO DE PERFORACION.

Este método es el resultado de las necesidades que adolecen los sistemas anteriores, por tal motivo, dada la ventaja de uno y otro, es como aparece este sistema..

Los equipos más modernos son de este tipo y contienen por lo general, los siguientes módulos constructivos:

- a) Equipo para generar la potencia necesaria y hacer girar la herramienta de perforación en algunos casos (Fig. No. 8)
- b) Sistema hidráulico con variedad de funciones, como el levante de la torre metálica, nivelación de la plataforma de perforación, aplicación de presión sobre la herramienta de ataque - - (Pull-Down), movilidad de la mesa rotaria para las maniobras de entubado del pozo, etc.
- c) Equipos constituidos con el sistema Con-Cor, o sea de muestreo continuo, en la que se utiliza doble tubería de perforación y la extracción del recorte se hace por el interior de la tubería

o bien aprovechando el sistema se puede cambiar indistintamente la circulación usando lodos de perforación, volviendo al equipo de circulación directa en inversa (Fig. No. 10).

d) Sistema de compresores para el uso del aire en la operación del martillo neumático, que mediante su golpeteo la barrena va cincelando la roca y el aire en su recorrido extrae los recortes a la superficie por el espacio anular ó también se usa cuando el equipo cuenta con doble tubería.

e) Equipos de bombeo para el uso de fluidos de perforación o espumantes, con el propósito de aligerar la columna del lodo y extraer los recortes, cuando se tienen grandes profundidades.

f) Equipos en varios diseños, desde los ligeros a los pesados, según el caso.

g) Extensa variedad en los diámetros de la herramienta de ataque.

Como se puede apreciar, estos por su diseño y versatilidad en sus adaptaciones de acuerdo con las necesidades que se presentan, pueden trabajar en indistinta manera, usando además herramientas de diamante o bien "pastillas ó botones" de carburo de tungsteno, que permite con esto una mayor velocidad de penetración.

LODOS DE PERFORACION.

En la perforación rotatoria mucho depende del manejo del sistema de circulación. La eliminación correcta y continua del material cortado por la barrena, evita la acumulación de los recortes y que se "peque" dentro de los poros de la roca, reduce la tendencia de las paredes a derrumbarse; lubrica la tubería de perforación, evita la pérdida del fluido hacia adentro de las formaciones y de baja presión de modo que no se interrumpa la circulación con los recortes hasta la superficie; aísla los horizontes con gas o agua de manera que ellos vayan a perjudicar la perforación, esto último con cuidado para no dañar las formaciones productoras. Estas son consideraciones de

gran importancia especialmente en la perforación profunda y su logro con éxito requiere de un control preciso del volumen, presión y propiedades físicas del fluido circulando. (Fig. No. 11)

Como se verá el comportamiento del lodo es extremadamente complejo, pero dadas las necesidades de su utilización, solamente mencionaré algunas características, las más importantes. Estas son:

El agua libre y el espesor de la costra de lodo.

La densidad.

La viscosidad y la tixotropía;

que son las que condicionan el sostenimiento de las paredes del sondeo y la facilidad de poder trabajar.

Agua libre y Costra. La formación sobre las paredes del sondeo de una costra que las sostenga, es la única justificación del empleo de un lodo como fluido de circulación. La creación de una costra es el resultado de la absorción por el terreno del agua libre del lodo. Es preciso que esta costra sea simultáneamente delgada y resistente para permitir el paso de la herramienta de perforación a la vez que asegurar la estabilidad de las paredes. Para que ésta sea adecuada, es necesario determinar por medio de ensayos el espesor correspondiente, alcanzando por el lodo en el momento que se está utilizando.

La Densidad. El valor de la densidad suele ser aproximadamente 1.2 y puede aumentarse para impedir la entrada en el pozo de algunos mantos cautivos mientras se realiza la perforación, además, un lodo denso ejerce contra las paredes del pozo una contra presión que mantiene las formaciones en su sitio. Pero cuidado con su uso excesivo, procure no utilizar un lodo demasiado denso, para evitar maniobras posteriores con resultados inciertos que provoquen un pozo de baja producción.

Tixotropía. Es la propiedad de un líquido por la que se convierte en un gel cuando no circula. Esta propiedad es muy apreciada en los lodos, porque un gel así formado, cada vez que se para la circulación impide que el recorte caiga al fondo del pozo y bloquee la herramienta de perforación. Sin embargo, no debe ser demasiado grande, para que no impida que se restablezca la circulación al volver a poner en marcha las bombas.

El consumo del lodo, que circula en circuito cerrado, es pequeño, teóricamente bastará aumentar la cantidad del mismo para compensar el aumento del volumen de la perforación debido al avance.

En realidad, algunas veces puede hacerse preciso su renovación o su modificación.

Un horizonte permeable puede absorber lodo. Si se trata de una fisura, el lodo de parece hasta que se obture la salida. Entonces hace falta compensar las pérdidas.

Algunas arcillas que forman horizontes importantes pueden incrementar peligrosamente la viscosidad; entonces se impone una reducción de la misma.

Las aguas saladas, el yeso, el cemento, pueden flocular al lodo, bloqueando así la herramienta, en este caso al detectar a estos es preciso cambiar de lodo, hacerlo resistente a estos agentes.

En fin, un exceso de arena en el lodo, provoca el desgaste de las bombas, tubos y aumento del agua libre. Debe reemplazar todo el lodo.

Por todo esto y más se hace necesario una vigilancia del lodo durante la perforación.

Lodos de Arcilla.

Lodos de emulsión de Aceite.

Lodos de agua dulce con: fosfatos, quebracha y sosa caústica, calcio.

Lodos salados de cloruro sódico o cálcico.

Lodos de silicato sódico.

Lodos a base de productos orgánicos, almidón, Revert entre otros.

Eliminación de la Costra.

Los pozos cuando se ponen en producción o bien para determinar su capacidad específica, es necesario eliminar el enjarre provocado durante la perforación y esto se puede lograr de la forma siguiente:

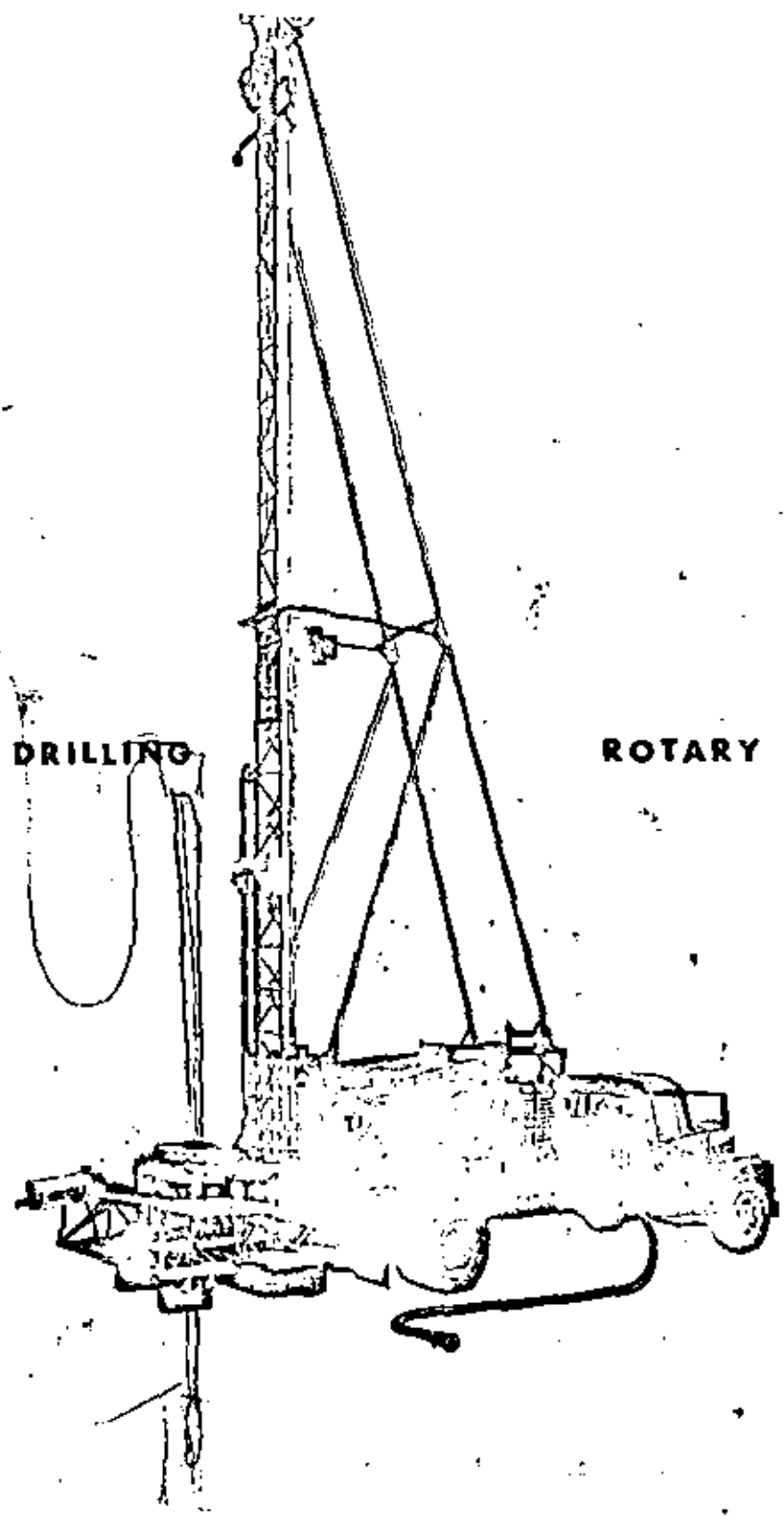
Por medio mecánico, como raspadores, agitadores, etc.

Reabsorber la costra por vía química, empleando floculantes.

Aprovechar que las partículas que forman la costra tienen cargas negativas para desplazarlas mediante un cambio de campo eléctrico. Consiste en unir a tierra el polo negativo de un generador de corriente continua y el ánodo frente al horizonte que se desea limpiar. Procedimiento patentado por la Sociedad Holandesa. Es interesante, pasado un momento, cambiar el sentido de la corriente durante un tiempo corto, para que de ésta manera se favorezca la salida de los líquidos hacia el pozo.

PERCUSSION DRILLING

ROTARY DRILLING



**WALKER-NEEVE
MANUFACTURING CO. INC.**

POST OFFICE BOX 2490

WICHITA FALLS, TEXAS

CABLE ADDRESS WALKNER

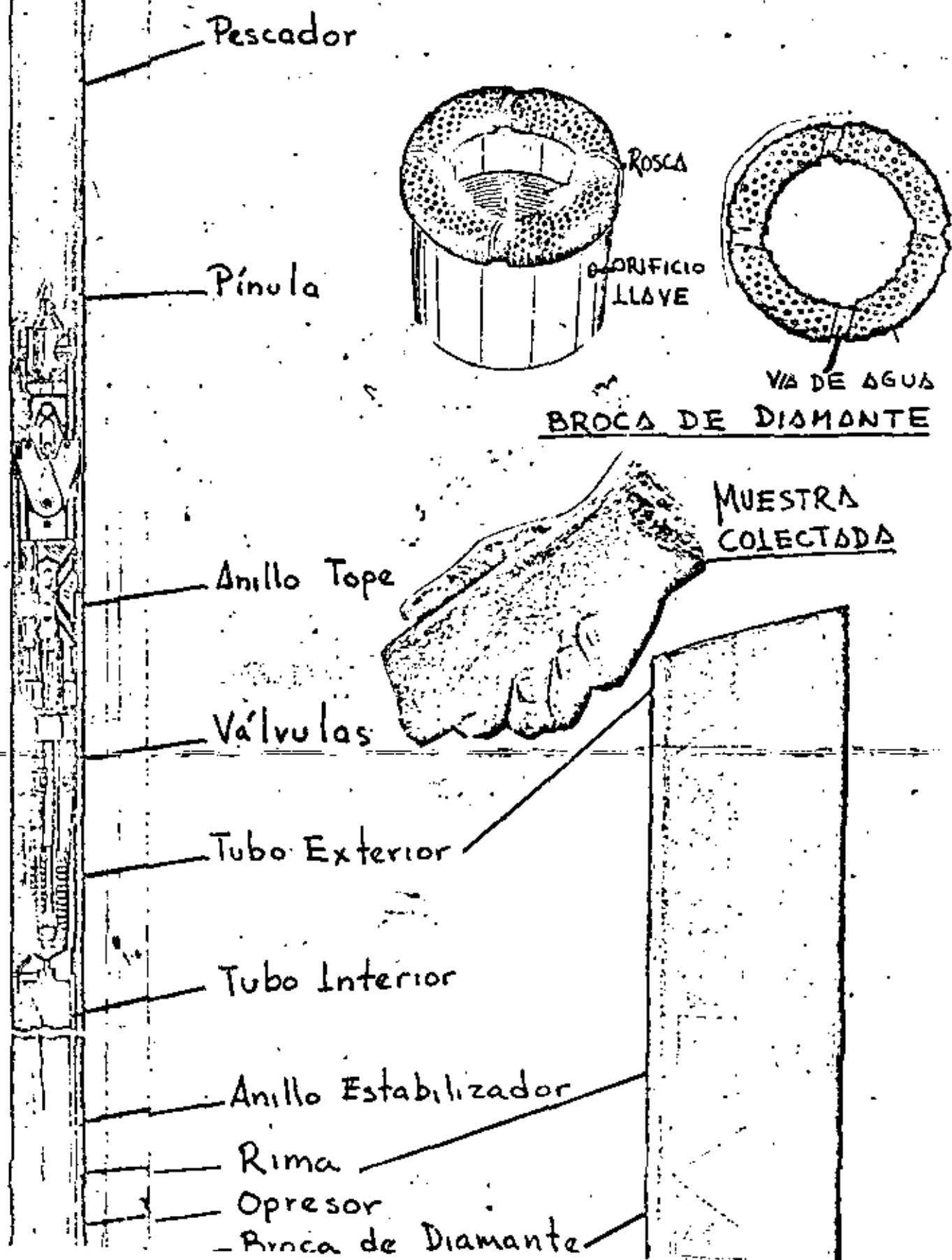
TELEX 734411

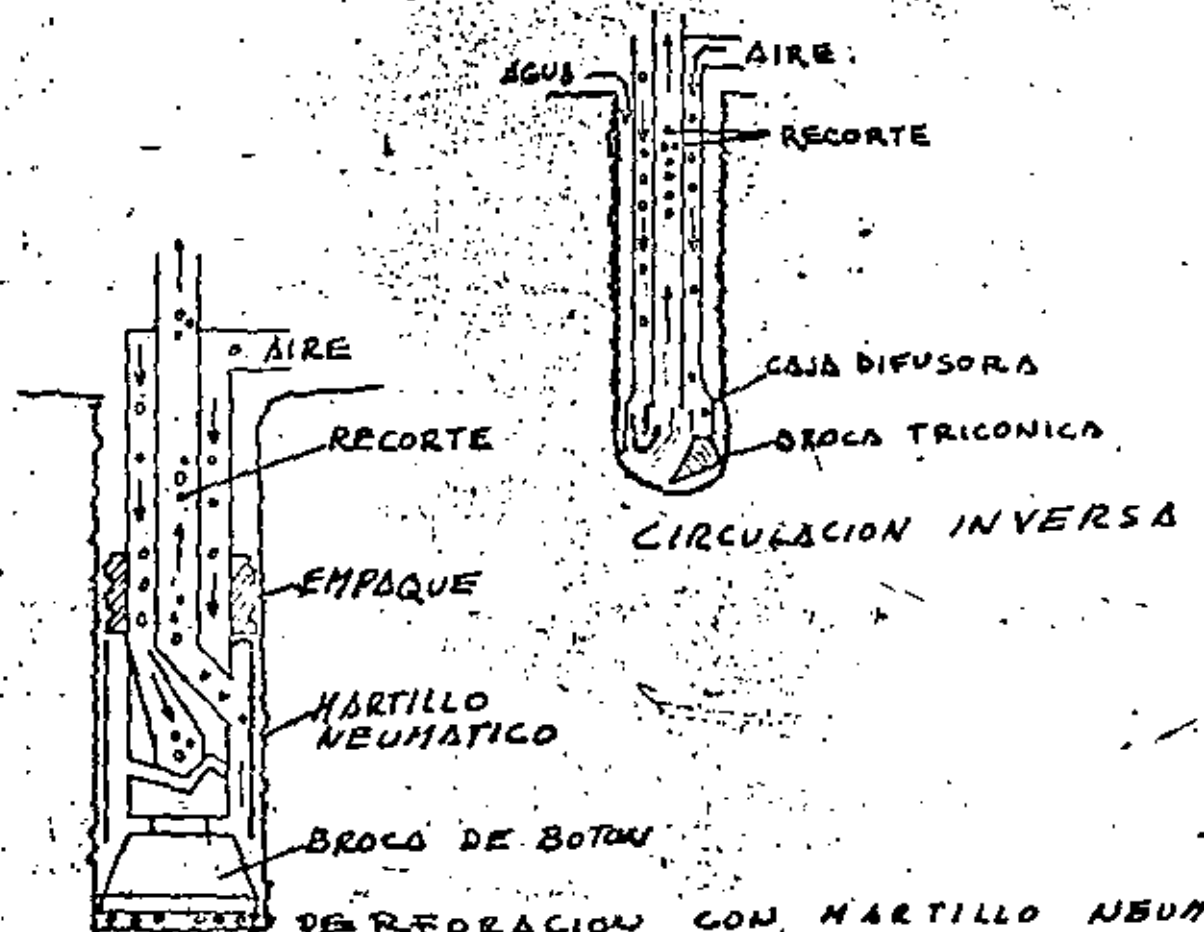
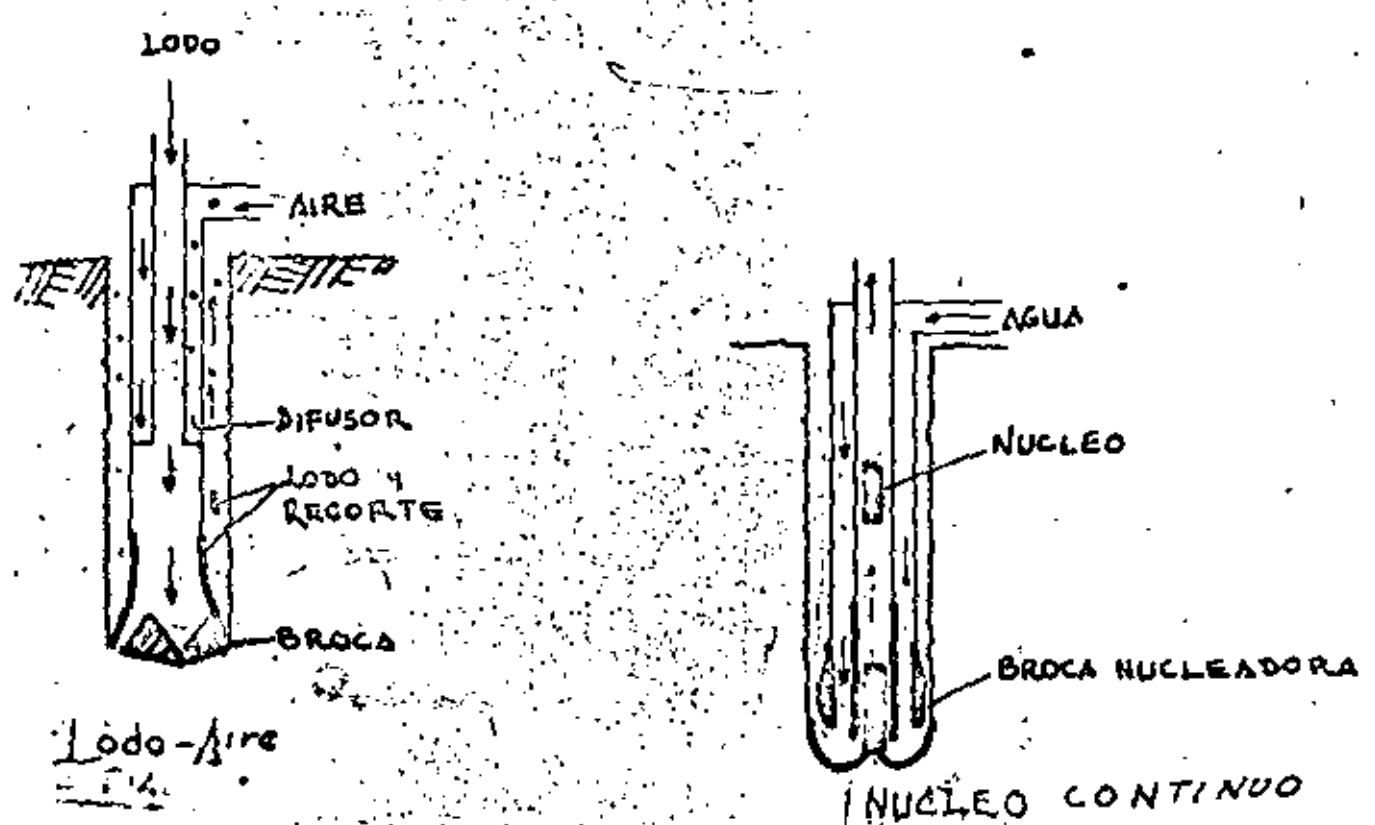
PHONE (817) 723-4000

BARRIL MUESTREAJOR SISTEMA

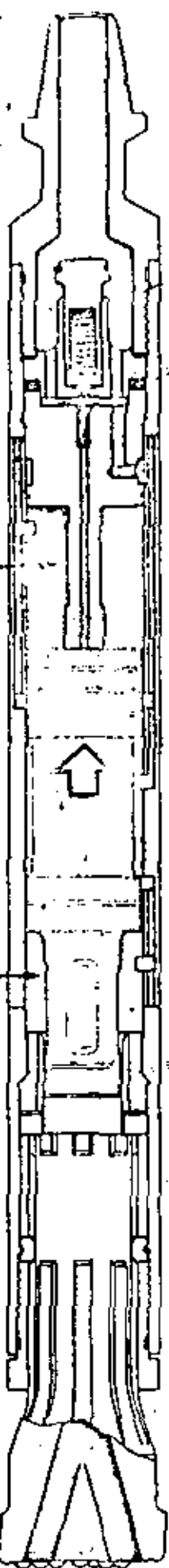
"WIRE LINE"

17

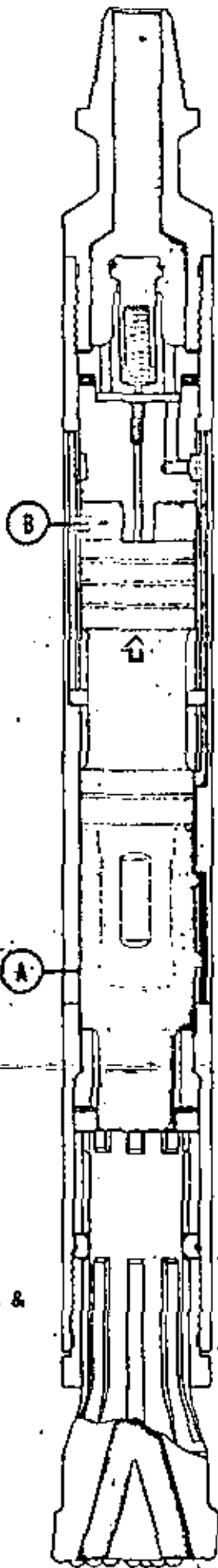




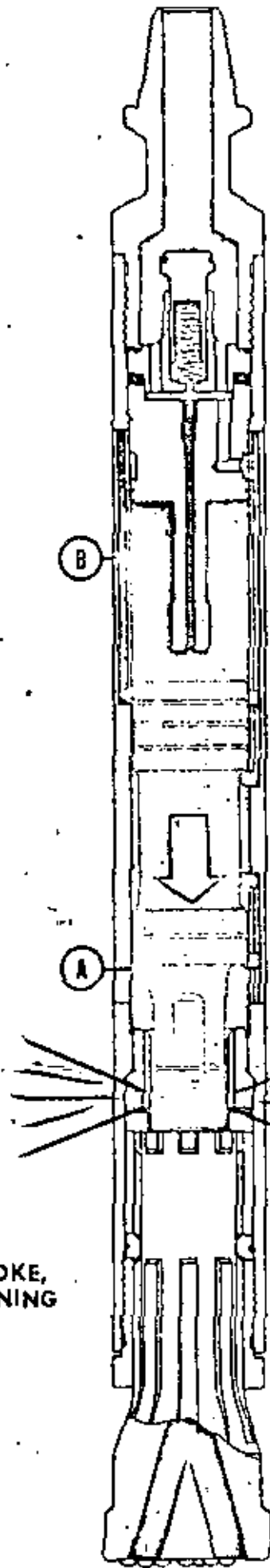
DIVERSOS TIPOS Y USOS DE LA DOBLE TUBERIA



2.
UP-STROKE,
MOMENTUM &
EXPANSION

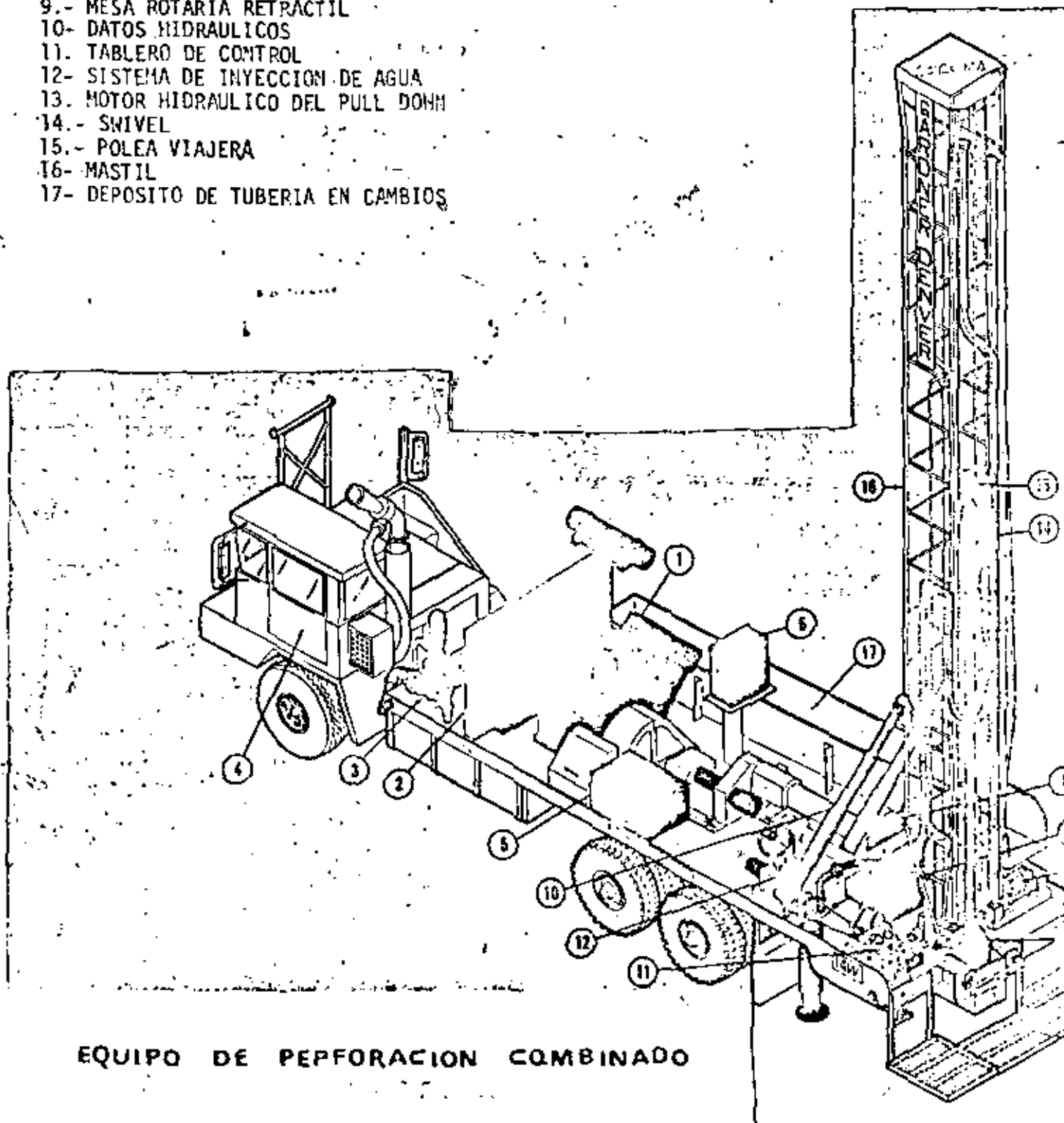


3.
UP-STROKE,
CUSHIONING



4.
DOWN-STROKE,
IMPACT

- 1.- COMPRESOR
- 2.- VENTILADOR
- 3.- BOMBA DE LODOS
- 4.- CABINA
- 5.- DEPOSITO DE ACEITE HIDRAULICO
- 6.- FILTRO DE AIRE
- 7.- MALACATE
- 8.- CLUTCH
- 9.- MESA ROTARIA RETRACTIL
- 10.- DATOS HIDRAULICOS
- 11.- TABLERO DE CONTROL
- 12.- SISTEMA DE INYECCION DE AGUA
- 13.- MOTOR HIDRAULICO DEL PULL DOWN
- 14.- SWIVEL
- 15.- POLEA VIAJERA
- 16.- MASTIL
- 17.- DEPOSITO DE TUBERIA EN CAMBIOS



EQUIPO DE PEPFORACION COMBINADO

Limpieza Inicial.

Definición y Ejecución.- Por limpieza o desarrollo primario, se entienden todas las maniobras encaminadas a producir agitación dentro del pozo, filtro colocado y formaciones vecinas, logrando con esto un aumento en la porosidad y permeabilidad, desalojando, de la zona periférica de mayor diámetro posible, los materiales finos de las formaciones.

Una vez concluido un pozo, es decir una vez que se ha instalado el ademe o cedazo y se ha engravado el pozo, en formaciones compactas y estables esto no es necesario, es preciso extraer los restos de lodos y material de recorte de la perforación, estabilizar las paredes de la capa productora y tratar de obtener el mayor caudal específico posible. A estas operaciones se les conoce con el nombre de desarrollo del pozo. También se llama desarrollo a otras operaciones cuya misión es la de mejorar el caudal en determinadas ocasiones, tales como la mencionada anteriormente, restablecer el caudal total o parcialmente de un pozo que sufre incrustaciones y/o corrosiones, u otro tipo de acción que lleve a disminuir el área de filtración y por supuesto su rendimiento (Rehabilitación), ó producir cambios en el acuífero ya sea por métodos mecánicos, químicos y otros, para reducir la resistencia al flujo de forma notable (Estimulación).

En realidad se trata de diferentes aspectos de una misma cosa, aplicados en diversas circunstancias, y por ello es frecuente denominarlos con el nombre genérico de desarrollo. A pesar de que resulta evidente la necesidad del desarrollo de un pozo, no siempre se realiza, en general por desconocimiento de sus ventajas, por ahorrar gastos o bien, por el temor a una inapropiada técnica de desarrollo ó una deficiente aplicación pueda empeorar las condiciones del pozo, a pesar de que

los resultados suelen compensarlo. No es raro que un mal desarrollo afecte directamente el equipo de bombeo definitivo, por la constante invasión de material fino en suspensión, los que al incrementar su volumen de extracción provocan asentamientos en las formaciones atravesadas, colapso del ademe, rupturas, que un buen desarrollo hubiese eliminado y estabilizado.

DESARROLLO EN MATERIALES GRANULARES NO CONSOLIDADOS.

Con esta maniobra se trata de eliminar el material fino, incluido dentro de los materiales granulares en la periferia del pozo, facilitando la circulación del agua en su viaje a la superficie, que pueden producir pérdidas de carga o turbulencia y por lo mismo, un continuo movimiento de filtro de grava colocado y por consiguiente la inestabilidad de las paredes del pozo. No es práctica común establecer una gráfica granulométrica en el que se indiquen en porcentos los tamaños retenidos o -- que pasan por determinada malla los clásticos que integran el acuífero por explotado que estos datos son indispensables para la correcta selección del filtro artificial por colocar y el tipo y diámetro de la ranura del ademe. Aplicando los criterios de Terzaghi-Bertran o bien la de Jhonson Division, se logra diseñar un filtro de grava que retenga hasta el 90% de material fino en suspensión e imprimirle una permeabilidad mayor que la tenida por la propia formación, siendo esencial para obtener buenos resultados. En general y en condiciones adecuadas los pozos con un desarrollo natural suelen ser mejores que los pozos con filtro artificial, en cuanto a seguridad de funcionamiento y duración, ofrece además ventajas económicas ya que se perfora a menor diámetro y no hace falta suministrar grava al pozo, solo necesita entubarlo con una ranura adecuada y material necesario de acuerdo con la calidad del agua por explotar. Cuanto mayor sea el espesor del relleno artificial de grava, más difícil es limpiar la cara de la propia formación, la experiencia, práctica ha demostrado que un espesor de 7 cm. estando el ademe centrado, es el adecuado.

Los métodos más usuales para el desarrollo de un pozo, son los de sobrebombeo y los de vaiven (Bombeo intermitente, pistoneo, descarga de aire comprimido, chorro de agua de alta velocidad).

METODO DE SOBREBOMBEO.

Consiste en bombear el pozo con un caudal mayor al que se pretende extraer normalmente del mismo. Sencillo y económico, pero incompleto, debido a que el fuerte flujo va en un solo sentido y los granos finos se acumulan en los granos gruesos y rejilla, resultando una estabilización parcial que pasará una vez, que pare el equipo de bombeo y el caudal de salida regrese a la formación acuífera, provocando un golpe de ariete sobre las formaciones granulares y por supuesto la remoción del filtro colocado e inestabilidad de las paredes del pozo.

METODOS DE VAIVEN

El método de bombeo intermitente.- Consiste en provocar paros y arranques sucesivos de la bomba, con el objeto de crear variaciones bruscas de presión. Se usa una bomba de turbina para pozo profundo, o bien, una bomba centrífuga de eje vertical, para niveles someros. La desventaja de este método es que desgasta los equipos de bombeo y si se pueden controlar los gastos, de preferencia se iniciase con el menor gasto posible y aumentarlo gradualmente hasta el máximo permisible.

Otro método de contra-corriente consiste en verter agua dentro del pozo lo más rápido posible y luego extraer agua del pozo con una cuchara o bomba de arena. El mejor método de lavar un pozo a contracorriente es introducir por gravedad o a presión una gran cantidad de agua provocando una elevación del nivel del pozo y luego producir descensos bruscos de presión.

Pistoneo.- Este consiste en comprimir y aspirar el agua en el pozo, para producir flujo recíproco del agua a través de las ranuras y filtro. Se puede producir el efecto con una cuchara con contrapeso o bien, una barra de perforación, lo normal es hacer subir y bajar un pistón o émbolo buzo, dentro del ademe, generalmente se confecciona con discos de hule o cuero y aprisionados por rodetes de madera, los diámetros se ajustan a los interiores del ademe del pizi (Fig. 1).

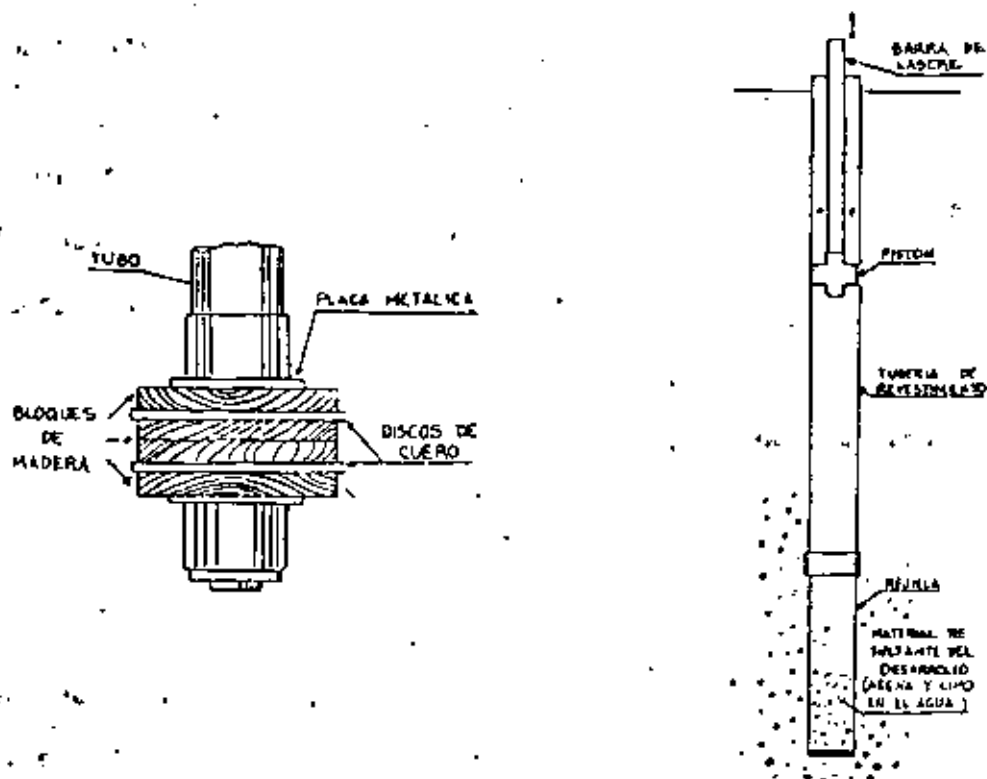


Fig. 1.- Desarrollo de Pozos por Pistoneo.

El material empujado hacia el interior de ademe, posteriormente es desalojado por la cuchara de charalla o cualquier otro tipo de extracción.

METODO DE AIRE COMPRIMIDO.

Este puede ser de Pozo abierto o de Pozo cerrado, en ambos casos se requiere de un compresor con capacidad de 0.5 m^3 o mayor, de 7 a 10 Kg/cm^2 de presión de trabajo, tubería de agua de unos 7.5 cm de diámetro y otra denominada de aire de 2.5 cm. de diámetro, esta última tubería sería accionada en carreras cortas de unos 60 cm. aproximadamente hacia arriba o hacia abajo con el objeto de inyectar presión o

hacer fluir el agua. (sifoneo).

METODO DE POZO ABIERTO.

El desarrollo mediante este método se basa en el principio de combinar una oleada y el bombeo. Se produce un fuerte oleaje soltando repentinamente grandes volúmenes de aire y su bombeo instantaneo se efectúa por elevación normal del agua mediante el aire comprimido. El éxito depende de la correcta aplicación de aire y de bombeo (Figura 2).

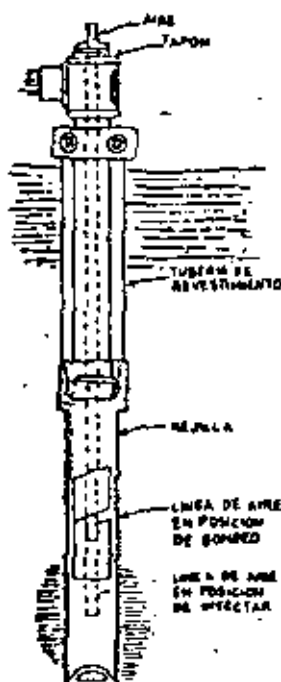


Fig. 2.- Desarrollo de aire comprimido.- Método para pozo abierto.

Para llevar a cabo con éxito el desarrollo es necesario que la inmersión de la tubería de aire sea por lo menos de un 60%. En pozos profundos, donde existe una carga considerable de agua, aún cuando sea baja la inmersión, se puede realizar un buen trabajo. Se hace recíprocante el movimiento de la línea de aire, respecto a la tubería de agua, para provocar inyección de aire e inmediatamente subir la línea de aire para bombear el agua, esta maniobra se realiza sucesivamente en tramos cortos, hasta recorrer la tubería ranurada con que cuenta el pozo.

En este método se cierra la parte superior del pozo, haciendo un orificio por donde bajará la línea de agua y aire, se dispone el ademe de tal forma que la presión del aire se acumule dentro de la tubería y forzar al agua contenida en el ademe que sea expulsada por la porción ranurada del pozo, hacia la formación acuífera.

(Fig. 3).

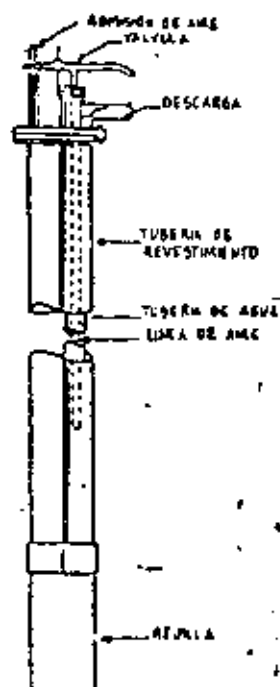


Fig. 3.- Desarrollo con Aire Comprimido. Método Pozo Cerrado.

Para llevar a cabo la maniobra se colocan a la tubería de agua una válvula para el control de descarga. Se mantiene la válvula de aire en posición de suministro al pozo y la válvula de descarga abierta, de esta forma se bombeará agua a la superficie hasta que salga clara, se detiene el bombeo y se permite ascendentemente recuperarse el nivel original, en seguida se cierra la válvula de descarga y se pone la válvula de aire en inyección, ésta acción provoca que el agua sea arrojada fuera del pozo, en la porción ranurada del pozo y al oír escapar el aire por el tubo de descarga o espacio anular, se cierra el paso del aire y se abre la de descarga, para permitir que el agua vuelva de nuevo a su nivel, repitiéndose el proceso una y otra vez, es aconsejable limpiar al pozo de los sedimentos acumulados por tales maniobras. Es de

utilidad para los casos en que no se desee provocar un fuerte desarrollo y especialmente útil, cuando ya existe una instalación de aire comprimido que pueda ser llevado al Pozo.

DESARROLLO MEDIANTE CHORROS DE AGUA HORIZONTALES DE ALTA PRESION.

El chorro de agua es una forma muy efectiva de desarrollo de pozos en materiales, en especial cuando se emplean rejillas de ranura continua, aunque es aceptable -- con otro tipo de cedazo. El procedimiento es lanzar chorros de agua a través de las aberturas, de modo que se agite la formación acuífera o filtro colocado. (Fig. 4).

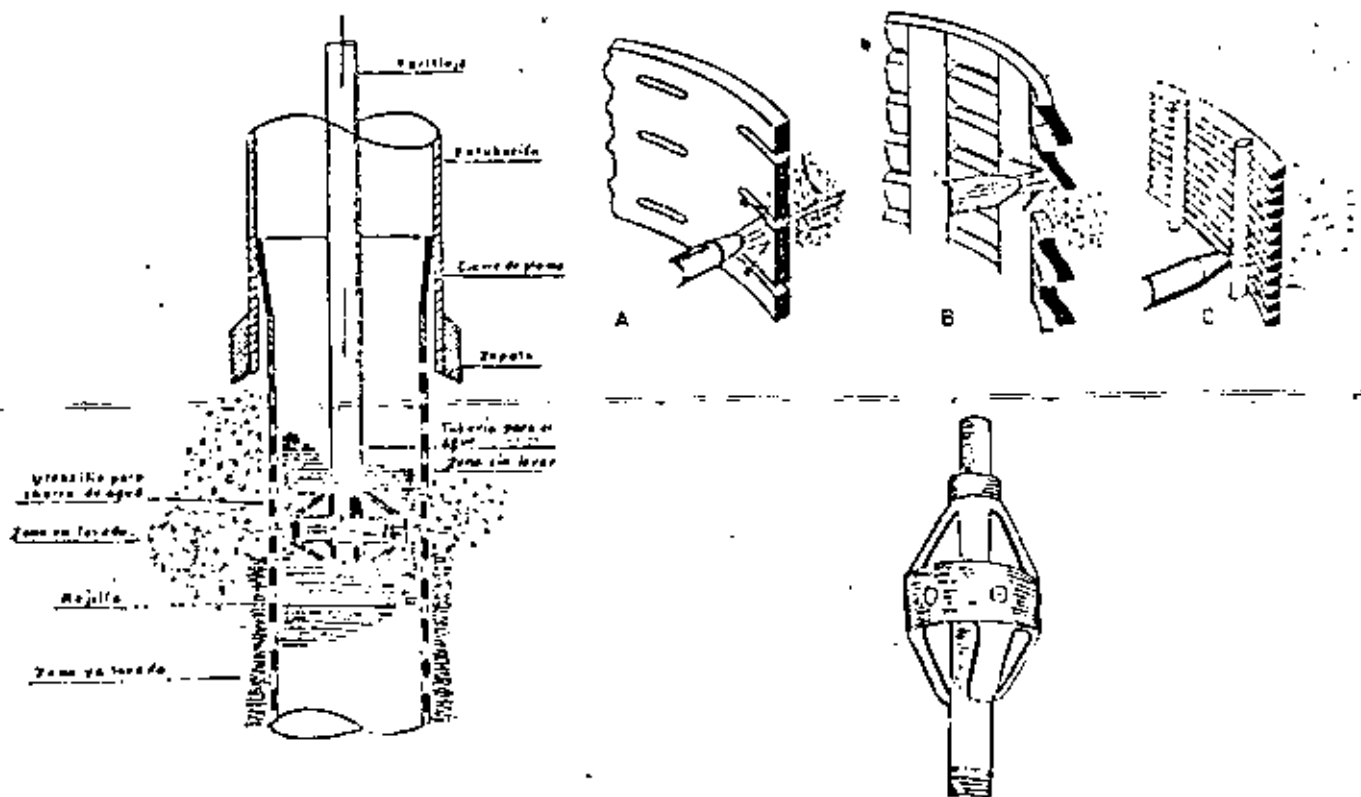


Fig. 4. - Esquema ilustrativo de las piezas, operación del procedimiento de chorro de agua horizontal de Alta Presión.

Consta de una pieza en la que se encuentran unas tuberías (3 ó 4) en las que se reduce su diámetro de salida, para que trabaje como ciflón o Jet, de un diámetro considerando la longitud de las toberas de 2 cm. de espacio anular menor que el diámetro interior del cedazo. El dispositivo se hace girar lentamente con el objeto de barrer toda la zona ranurada y se va izando lentamente, hasta recorrer la totalidad del tramo ranurado. Las toberas cuentan con orificio de salida de 5, ó 12 mm. de diámetro y en posiciones variables de la altura, tiene cerrado el fondo y se conecta a la sarta de tubería hasta la superficie y a su vez a la descarga de la bomba de alta presión y gasto elevado. La maniobra se mejora si simultáneamente al bombeo de agua a presión, se inyecta algún pirofosfato o aditivo químico generalmente dispersante o floculante de materiales arcillos que pudieran encontrarse en la formación productora.

SELECCION DEL FILTRO Y EL ADEME.

Una vez terminada la perforación y dependiendo de los materiales atravesados, se procede al ademado y engravado del pozo, estas maniobras se realizan cuando las formaciones acuíferas, se encuentran constituidas por materiales granulares no consolidadas o rocas muy fracturadas o alteradas; dado que al perforar se requieren muestras del subsuelo para determinar las capas ya que con estos se procede a efectuar una granulometría de la formación productora graficando sus resultados.

Pasos que deben seguirse en el diseño del empaque de grava:

1.- Construir las curvas representativas de los análisis granulométricos de cada uno de los diferentes estratos que constituyen el acuífero. Determinar cuál es el más fino, debido a que el filtro se diseñará con base a esta graduación.

a) Terzagui y Bertran recomiendan:

$$5 < \frac{D_{15} \text{ filtro}}{D_{15} \text{ material protegido}} < 40$$

Esto garantiza que el filtro posea una permeabilidad mayor que el material por proteger.

b)
$$\frac{D_{15} \text{ filtro}}{D_{85} \text{ material protegido}} < 5$$

Esto evita que el material por proteger sea arrastrado por el flujo del agua.

c) La curva granulométrica del material del filtro debe tener un coeficiente de uniformidad menor de 2.5

$$\text{Cu filtro} \quad 2.5 \quad \text{Cu} \quad \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Es deseable que el material del filtro sea lo más uniforme posible, o sea, que el material del filtro deberá ser mal graduado.

- d) El porcentaje de cada diámetro del material del filtro puede variar 8% en más o menos, excepto en los extremos. Esto es para permitir cierta flexibilidad en la selección de los materiales.
- e) El tamaño de las aberturas del ademe debe ser igual o menor al tamaño necesario para evitar el 90% del material del acuífero.
- f) El filtro de preferencia debe ser redondeado, limpio de finos o tierra, clásticos de sílice en lugar que calcareos y que el espesor del filtro entre el ademe y la formación, sea menor de 7.62 cm (3") t bi exceder de kis 29.39 cms. (8"). Ya que se tiene definido el filtro por colocar se procede a la selección del cedazo. Cualquier rejilla debe cumplir con cuatro funciones básicas en un pozo:
- 1) Soportar las cargas que sobre él imponga el material que constituye el acuífero, además de su propio peso, sea a tensión o compresión.
 - 2) Retener el filtro granular cuando exista, impidiendo su paso al interior del pozo, así como del mayor porciento posible de material fino en suspensión, durante la operación.
 - 3) Permitir el paso del agua al interior del pozo en flujo laminar, no turbulento o sea que no se esté removiendo continuamente el filtro o los materiales granulares de la formación productora.
 - 4) Mantener constante a través del tiempo el tamaño de las aberturas

del cedazo, debido al contenido de minerales que afectan el funcionamiento del pozo y su calidad.

Dado que la productividad de un pozo, depende del área de la filtración del cedazo que de su diámetro y tomando en cuenta que el flujo sea laminar, así impedimos el arrastre de finos de donde:

$$Q = V a$$

Q = caudal
V = Velocidad del flujo
A = Area de paso.

Se aprecia que la velocidad, pasa en caudal dado, decrece la forma directamente proporcional al aumento del área de paso, o sea que un cedazo será mejor cuando mayor sea su área de infiltración. Además se ha comprobado que un flujo lento retarda, cuando existen, los problemas de corrosión e incrustación, de aquí que es práctica común utilizar una velocidad de 3 cm/seg. como el ideal. Por otra parte el área de infiltración permite reducir el diámetro de ademe y por consiguiente ahorro en el costo del pozo.

Otro factor que es necesario considerar es el tipo de agua por explotar, dado que la calidad del agua afecta al tipo de tubería o filtro colocado es necesario conocer y colocar el ademe más adecuado, existiendo en el mercado una gran variedad de tipos y calidades de cedazo (tabla No. 1)

Dado lo anterior se recomienda emplear la siguiente fórmula:

$$d = \frac{Q}{V \pi r^2 h} \quad \text{donde:}$$

d = diámetro del cedazo teórico en metros (inmediato superior en el mercado).

Q = Gasto en m^3 /seg.

V = Velocidad deseada 0.03 m/seg.

h = Longitud total del cedazo en metros. f = Fracción de huecos en el cedazo

La mayoría de los fabricantes, proporcionan tablas en las que aparece el área disponible (tabla No. 1) por unidad de longitud en los diferentes diámetros y tamaños de ranuras. Es necesario considerar la profundidad del ademe para futuros abatimientos y colocación de la pichanca de la bomba, esto último con el objeto de evitar la colocación de la misma frente al área ranurada, esto hace que se incremente la velocidad localmente perjudicando al cedazo.

TABLA No. 1
AREAS LIBRES EN PORCIENTO Y cm²/m DE DIVERSOS TIPOS DE CEDAZOS PARA POZOS DE AGUA

Tipos de cedazos	Mallas (mm)										Mallas (micras)																			
	100					200					400					800					1500					3000				
	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m	Libres (%)	cm ² /m		
1	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000	100	10000		
2	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500	95	9500		
3	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000	90	9000		
4	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500	85	8500		
5	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000	80	8000		
6	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500	75	7500		
7	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000	70	7000		
8	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500	65	6500		
9	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000	60	6000		
10	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500	55	5500		
11	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000	50	5000		
12	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500	45	4500		
13	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000	40	4000		
14	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500	35	3500		
15	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000	30	3000		
16	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500	25	2500		
17	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000	20	2000		
18	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500	15	1500		
19	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000	10	1000		
20	5	500	5	500	5	500	5	500	5	500	5	500	5	500	5	500	5	500	5	500	5	500	5	500	5	500	5	500		

PRINCIPIOS DE DISEÑO PARA EQUIPOS DE BOMBEO.

Las consideraciones técnicas de orden general, que se toman en cuenta, son las pérdidas de energía que inciden en el total de los mecanismos en movimiento o estáticos, por rozamientos del fluido en movimiento, las dimensiones y características de todo el equipo y la selección de la unidad matriz que accionará a la columna o sistema.

El quipamiento se inicia una vez desarrollado y aforado el pozo, con sus datos incluyendo: el diámetro y profundidad del ademe, sus niveles (estático y dinámico), gasto máximo y el de operación o diseño, incorporando de ser posible los abatimientos medios anuales que sufre la región, tolerancias para la sumergencia de la bomba, tipo de bomba que considere el cliente de su preferencia u opcional, línea o sistemas locales de conducción eléctrica, sistemas de seguridad, instalación y de control.

Una vez integrados los datos anteriores, así como la altura de descarga, pérdidas por fricción, cambios de dirección, etc., en ciertas marcas coinciden en dar la fórmula siguiente, en la que se determina la potencia de la unidad motriz:

$$H.P. = \frac{Q}{76} \frac{H_t}{E} + P_f$$

De donde:

Q = Gasto litros por segundo

Ht = Carga dinámica total en mts.

76 = factor de conversión o constante

Pf = Pérdidas por la fricción en la totalidad de la columna en H.P.

E = Eficiencia del modelo de tazón

seleccionado.

Cada diámetro de columna tiene diversas opciones de flechas, cubreflechas que permiten con esto, una variabilidad de elección para un determinado diámetro de flecha,

incrementa las pérdidas y la potencia del motor, aumentando el costo de la bomba.

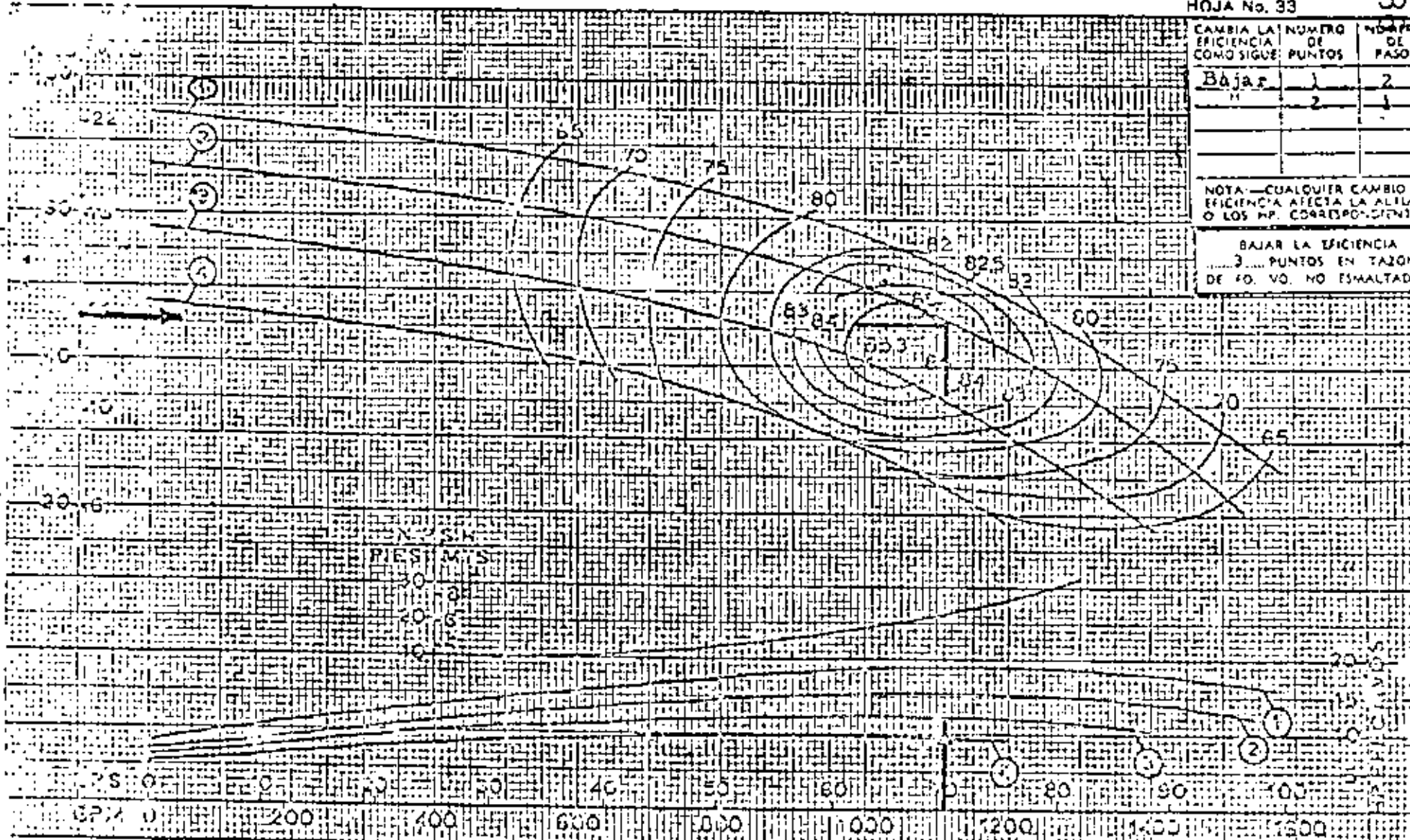
Resumiendo, al estimar el gasto por extraer y la altura donde será llevada, todo esto nos conduce a las siguientes consideraciones:

El diámetro de columna y descarga, tipo de tazón relacionado con el gasto, cabalaje y eficiencia requerida, así como las revoluciones por minuto para tal tazón, considerando un diámetro de flecha y respetando las tolerancias a profundidad, las pérdidas y su carga dinámica total; todo esto nos indica un motor o un cierto H.P., el que se ajustará al que se encuentre en el mercado o bien, se parte de éste último dato y se recorre nuevamente pero a la inversa, hasta determinar que flecha, cuántos tazones y de qué diámetro se requiere para subir y aportar el gasto solicitado. Posteriormente con los datos obtenidos se determina el tipo de cabeza o modelo. Es necesario efectuar el cálculo, considerando diferentes opciones, con el objeto de disminuir el costo de operación del equipo e incrementar su vida útil.

CAMBIA LA EFICIENCIA COMO SIGUE:	NUMERO DE PUNTOS	NUMERO DE PASO
Bajar	1	2
	2	1

NOTA.—CUALQUIER CAMBIO EFICIENCIA AFECTA LA ALIQUO LOS HP. CORRESPONDIENTE

BAJAR LA EFICIENCIA 3 PUNTOS EN TAZON DE 40. VO. NO ESMALTADO



RENDIMIENTO HIDRAULICO GARANTIZADO
 SE GARANTIZA EL PUNTO DESIGNADO UNICAMENTE
 EN UN PUNTO DADO A LA SUCCION
 DE LA ZONA,
 CON SUPERFICIA APROPIADA,
 Y SIN CARGA LIBRE DE GASES, AIRE O
 AGRESIVOS
 Y CON ESPACIO SUFICIENTE PARA
 EL IMPULSOR.

CURVA NUM.	IMPULSOR NUM	IMPULSOR DIAM.
1		8-7/8
2	2624332	8-11/16
3		8-3/16
4		7-11/16

PEERLESS TISA, S.A.
 MONTERREY, N. L., MEXICO
 8-71

RENDIMIENTO POR PASC	
TAZON	12MB
R. P. M.	1760
CURVA No.	2842929-

CALCULO DE EQUIPO DE BOMBEO DEL PUNTO: EL BATAN

CANTO _____ MUNICIPIO _____ ESTADO _____

PARA EL PUNTO E HIDRAULICO

PROFUNDIDAD DEL PUNTO 180 FT.

PROFUNDIDAD DE LA C. DE EQUIPO _____ FT.

RIEGO ESTÁTICO 102.55 FT.

RIEGO DINÁMICO DE APROX. _____ FT.

VELOCIDAD DE BOMBEO DE DISEÑO 117.00 383.76 FT.

COSTO DE APROX. _____ L.P.S. _____ G.P.A.

COSTO DE DISEÑO 32.00 L.P.S. 507.2 G.P.A. = 1920 L.P.M.

VELOCIDAD O CARGA LÍNEA ADIC. 500 FT.

ALTURA MANOMÉTRICA 122.00 400.16 FT.

MARCA DEL EQUIPO Medina CURVA SIMBOLOGICA M-V-A/4

R.P.M. _____ EFICIENCIA 74.5 FT/PASO

IMPULSOR _____ HP/PASO _____ INSCRIPCIÓN

POT. TEÓRICA 61.75 H.P.; ESPECIF. DE COLUMNA: 420'-6" Ø

$h_f =$ PERD. FRICC. HÍDR. COL. 3.0 POR CADA 100 FT.

$h_{f, tot} =$ 39.89 FT. COND. $3.0 \times 4.2 = 126/11 = 13.6$
 $3.0 \times 6.23 = 18.69$

HT = CARGA DINÁMICA TOTAL = 432.45 FT. = 131.84

HP = 3960 x 0.

FRICC. REC. FLECHA _____ HP.

FACTOR SERV. x H.P. _____ HP_{TOT} _____ POR CARGA

NO. DE PASOS = $\frac{HT}{FT/PASO} = \frac{432.45}{131.84} = 4$ HP = _____ P/CURVA

POTENCIA PERMISIBLE DE LA PECHA = _____ HP, A _____ R.P.M.

TONERACION DE LA PECHA _____ PULGS.

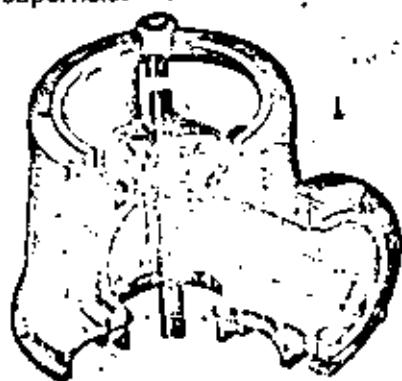
EMPUJE _____ LBS. Motor sumergible de 110 HP

OBSERVACIONES:

Características de construcción

CABEZAL DE DESCARGA LUBRICADO POR AGUA

Fabricado en hierro fundido grado
fino clase 30.
Aberturas amplias para fácil acceso
a la caja de estopas, con orejas
integrales para fácil manejo.
Brida de descarga fundida
integralmente para proporcionar
rigidez en la conexión de la
tubería.
También hay disponibles cabezales
bajo superficie.



CAJA DE EMPAQUES

El conjunto de la caja de estopas
incluye, caja de hierro fundido,
seis anillos de empaque de asbesto
impregnado de grafita, anillo linterna
de bronce, chumacera de bronce y
glándula bipartida.



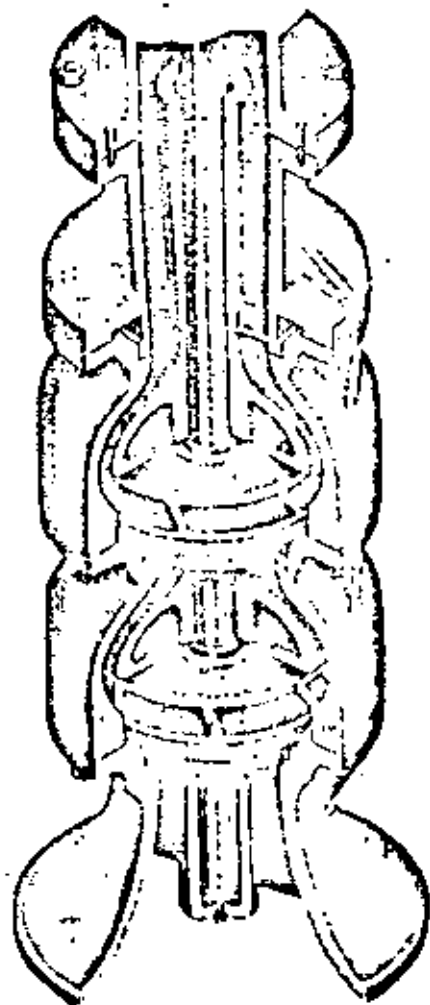
CONJUNTO DE COLUMNA LUBRICADA POR AGUA

Consiste de columna de acero
roscada tipo Ocelco, flecha de
acero 1045, portachumaceras tipo
reversible.
La portachumacera tipo "J" puede
ser usada dos veces en la misma
flecha, y simplemente invirtiendo su
posición y colocándola nuevamente
en la flecha.
La flecha de línea 1045 y los
coples de línea son standard.



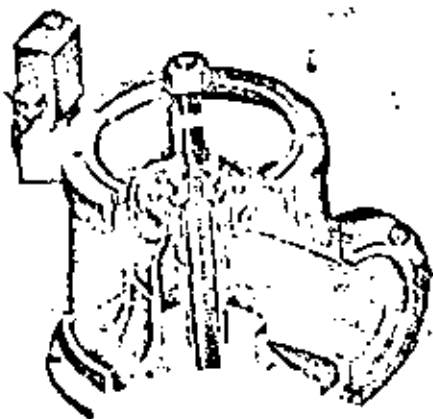
CONJUNTO DE TAZONES

Consiste en: caja de succión,
impulsores, tazones intermedios y
caja de descarga, puede ser de un
paso o de varios pasos, dependiendo
de los requerimientos de carga.
Los tazones son de hierro fundido
clase 30 y los impulsores de bronce,
ya sea de diseño semiabierto o
cerrado.



CABEZAL DE DESCARGA LUBRICADO POR ACEITE

Fabricada en hierro fundido grano fino clase 30.
 Aberturas amplias para fácil acceso a la caja de estopas, con orejas integrales para fácil manejo.
 Brida de descarga fundida integralmente para proporcionar rigidez en la conexión de la tubería.
 También hay disponibles cabezales bajo superficie.



DISEÑO DE IMPULSIONES

El tipo cerrado viene equipado con anillos de desgaste como construcción estándar. Proporciona una superficie de sellado para reducir al mínimo la recirculación de líquido, reduce el desgaste y mantiene una eficiencia alta. El diseño semiabierto también puede ser suministrado.



CONJUNTO DE COLUMNA LUBRICADA POR ACEITE

El conjunto de columna consiste en: tubo de columna, coples, conectores roscados, cubreflecha, flechas y chumaceras de línea. Un tubo extrareforzado protege las flechas y chumaceras de cualquier material extraño y lleva el aceite lubricante a todas las chumaceras de las flechas. Chumaceras de bronce roscadas sirven como coples a intervalos de 1.52 m. (5' 0''), estabilizadores de hule reforzado centran el tubo cubreflecha y chumaceras dentro de la columna.



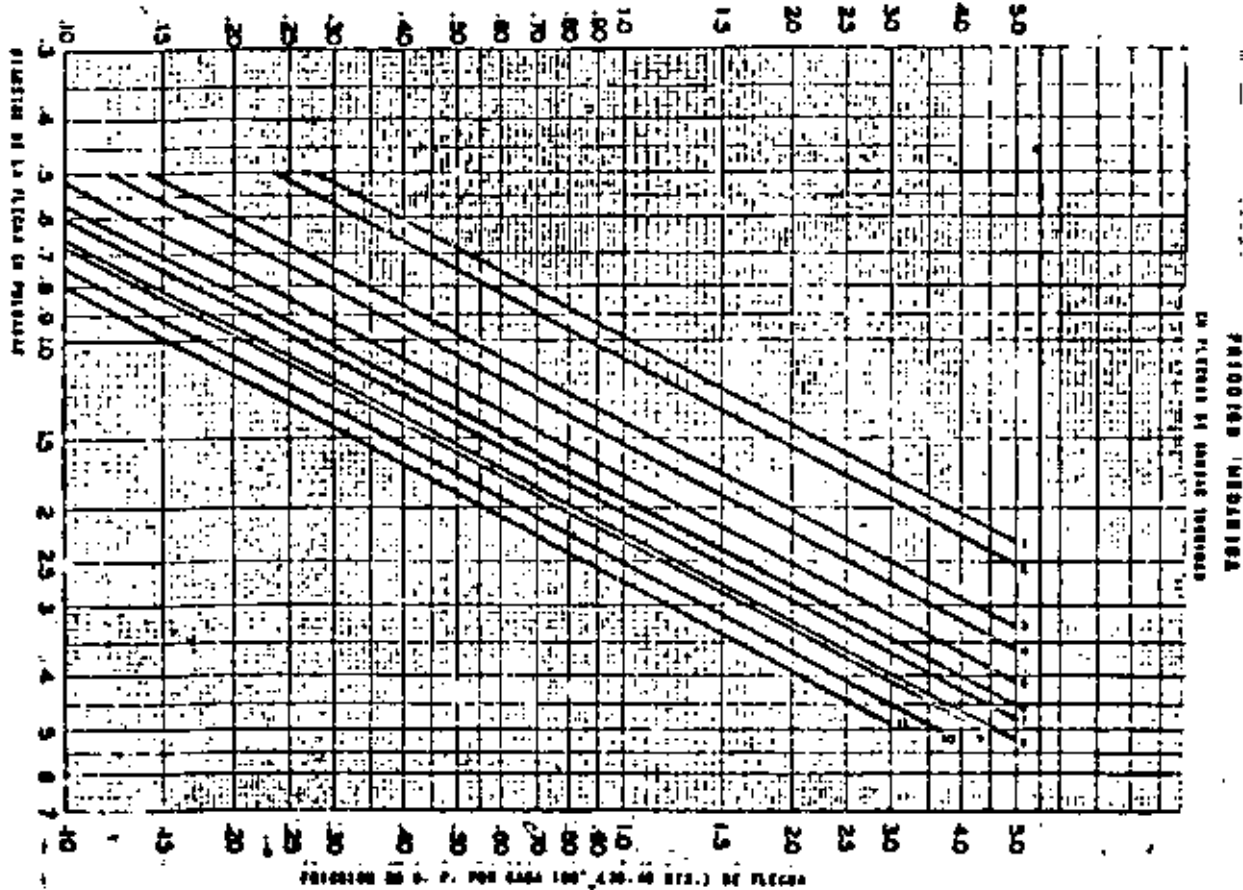
Muchas más opciones son disponibles sobre pedido

FRICCION MECANICA
EN LAS FLECHAS DE LAS BOMBAS TURBINAS (*)

TABLA N° 1

Longitud de la Flecha		DIAMETRO DE LA FLECHA										
		3/4"	1"	1 3/16"	1 7/16"	1 1/2"	1 11/16"	1 15/16"	2 3/16"	2 7/16"	2 11/16"	2 15/16"
Metros	Pies	Fricción Mecánica en H.P. A 1750 R.P.M.										
7.6	25	.06	.13	.18	.25	.29	.35	.45	.58	.71	.88	1.00
15.2	50	.15	.26	.36	.50	.58	.70	.90	1.15	1.42	1.68	2.00
22.9	75	.23	.39	.54	.75	.86	1.05	1.35	1.73	2.14	2.51	3.00
30.5	100	.30	.52	.72	1.00	1.15	1.40	1.80	2.30	2.85	3.35	4.00
38.1	125	.38	.65	.90	1.25	1.44	1.75	2.25	2.88	3.56	4.19	5.00
45.7	150	.45	.78	1.08	1.50	1.73	2.10	2.70	3.45	4.27	5.07	6.00
53.3	175	.53	.91	1.26	1.75	2.01	2.45	3.15	4.03	4.99	5.86	7.00
61.0	200	.60	1.04	1.44	2.00	2.30	2.80	3.60	4.50	5.70	6.70	8.00
68.6	225	.68	1.17	1.62	2.25	2.59	3.15	4.05	5.18	6.41	7.54	9.00
76.2	250	.75	1.30	1.80	2.50	2.88	3.50	4.50	5.75	7.12	8.38	10.00
83.8	275	.83	1.43	1.98	2.75	3.16	3.85	4.95	6.33	7.84	9.21	11.00
91.4	300	.90	1.56	2.16	3.00	3.45	4.20	5.40	6.90	8.55	10.05	12.00
99.0	325	.98	1.69	2.34	3.25	3.74	4.55	5.85	7.48	9.26	10.89	13.00
106.7	350	1.05	1.82	2.52	3.50	4.03	4.90	6.30	8.05	9.97	11.77	14.00
114.3	375	1.13	1.95	2.70	3.75	4.31	5.25	6.75	8.63	10.69	12.56	15.00
121.9	400	1.20	2.08	2.88	4.00	4.60	5.60	7.20	9.20	11.40	13.40	16.00
129.5	425	1.28	2.21	3.06	4.25	4.89	5.95	7.65	9.78	12.11	14.24	17.00
137.1	450	1.35	2.34	3.24	4.50	5.18	6.30	8.10	10.35	12.82	15.08	18.00
144.8	475	1.43	2.47	3.42	4.75	5.46	6.65	8.56	10.93	13.54	15.91	19.00
152.4	500	1.50	2.60	3.60	5.00	5.75	7.00	9.00	11.50	14.25	16.75	20.00
Fricción Mecánica en H.P. A 1450 R.P.M.												
7.6	25	.06	.11	.15	.23	.24	.30	.38	.48	.60	.73	.85
15.2	50	.12	.23	.30	.45	.48	.60	.75	.95	1.20	1.44	1.70
22.9	75	.19	.34	.45	.68	.71	.90	1.13	1.42	1.80	2.18	2.55
30.5	100	.25	.45	.60	.90	.95	1.20	1.60	1.90	2.40	2.90	3.40
38.1	125	.31	.56	.75	1.13	1.19	1.50	1.88	2.38	3.00	3.63	4.25
45.7	150	.38	.68	.90	1.35	1.43	1.80	2.25	2.85	3.60	4.35	5.10
53.3	175	.44	.79	1.05	1.58	1.66	2.10	2.63	3.32	4.20	5.08	5.95
61.0	200	.50	.90	1.20	1.80	1.90	2.40	3.00	3.80	4.80	5.80	6.80
68.6	225	.56	1.01	1.35	2.03	2.14	2.70	3.38	4.28	5.40	6.51	7.65
76.2	250	.63	1.13	1.50	2.25	2.38	3.00	3.75	4.75	6.00	7.25	8.50
83.8	275	.69	1.24	1.65	2.48	2.61	3.30	4.13	5.22	6.60	7.98	9.35
91.4	300	.75	1.35	1.80	2.70	2.85	3.60	4.50	5.70	7.20	8.70	10.20
99.0	325	.81	1.46	1.95	2.93	3.09	3.90	4.88	6.17	7.80	9.43	11.05
106.7	350	.88	1.58	2.10	3.15	3.33	4.20	5.25	6.65	8.40	10.15	11.90
114.3	375	.94	1.69	2.25	3.38	3.56	4.50	5.63	7.15	9.00	10.88	12.75
121.9	400	1.00	1.80	2.40	3.60	3.80	4.80	6.00	7.60	9.60	11.60	13.60
129.5	425	1.06	1.91	2.55	3.83	4.04	5.10	6.38	8.07	10.20	12.33	14.45
137.1	450	1.13	2.03	2.70	4.05	4.28	5.40	6.75	8.55	10.80	13.05	15.30
144.8	475	1.19	2.14	2.85	4.28	4.51	5.70	7.13	9.08	11.40	13.78	16.15
152.4	500	1.25	2.25	3.00	4.50	4.75	6.00	7.50	9.50	12.00	14.50	17.00

(*) Para valores no comprendidos en esta tabla vea gráfica No. 2



LÍNEA	R.P.M.
1	3450
2	2875
3	1750
4	1450
5	1160
6	968

LÍNEA	R.P.M.
7	870
8	725
9	700
10	560
11	485

La Tabla N° 3 da las pérdidas mecánicas de la flecha para diferentes diámetros por metro lineal obtenidos experimentalmente por los fabricantes.

Ciertas marcas coinciden en dar la fórmula siguiente, que se anota como determinante de la potencia en algún modelo de bomba exigido, siendo la siguiente:

$$HP = \frac{Q \times H_t}{76 \times E}$$

en la que:

Q = Gasto en litros por segundo

H_t = la carga dinámica total en metros

76 = una constante

E = la eficiencia del modelo de tazon seleccionado.

El resultado del cociente se ve aumentado por la fricción en la total de la columna en HP.

La potencia nominal del motor se ve aumentada para el motor de tipo eléctrico en una tolerancia o factor de seguridad de un 15% sobre esta cantidad para equilibrar cambios posibles de antemano, que inciden en el tiempo de operación del equipo, y que se señala en las Especificaciones de Equipamiento.

ALGUNAS CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL EMPLEO DE LAS ANTERIORES TABLAS MENCIONADAS.

Para el uso de la tabla N° 1 se requiere conocer el gasto de operación y el nivel de bombeo, graficados en ejes coordenados nos dan su punto de coincidencia en ese dominio, los valores de las pérdidas por fricción. Un conocimiento empírico del diámetro aproximado de la columna se nos señala como la raíz cuadrada del gasto operado o bien el diámetro de la columna elevado a la potencia dos como igual al gasto operado.

Cada diámetro de columna tiene diversas opciones de flechas y de cubreflechas o canasas, y permiten variabilidad de elección para un diámetro de flecha, su selección se hará en base lo discutido anteriormente en cuanto a gasto y flecha cuestionada.

La tabla No 2 da las pérdidas por fricción por metro lineal y son distinguidas para cada tipo de tubería y su material empleado en cada marca del mercado y es en base a una temperatura y velocidad del agua bombeada.

La tabla No. 3 proporciona los valores de pérdidas en HP en la flecha de la bomba.

La velocidad en RPM (revoluciones por minuto) de operación de la bomba para un diámetro de la flecha incrementan las pérdidas para el aumento de velocidad de la misma.

Pérdidas por fricción para agua, en pies por cada 100 pies de tubería (o en metros por cada 100 metros).
 Basada en la fórmula de Williams & Hazen, usando una constante de 100.

TABLE Nº 2

Tamaño del tubo		1/2"		3/4"		1"		1 1/4"		1 1/2"		2"		2 1/2"		3"		4"		5"		6"		Tamaño del tubo	
Galones por 100 pies por día		Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Vel. Pies Seg	Pérd. Carga Pies	Galones por 100 pies por día	
2	4	2.10	7.4	1.20	1.9	1.49	3.14	0.86	0.57	0.45	0.76	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	7	
4	8	4.21	29.0	2.41	7.0	2.23	4.55	1.70	1.07	0.94	1.51	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	8	
6	12	6.32	57.0	3.61	14.7	2.94	7.8	2.39	1.53	1.26	2.01	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	10	
8	16	8.42	98.0	4.81	25.0	3.72	11.7	2.14	1.35	1.17	1.63	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	12	
10	20	10.52	147.0	6.02	38.0	4.51	16.4	2.87	1.78	1.49	2.09	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	14	
12	24	12.61	204.0	7.23	51.0	5.30	21.1	3.58	2.28	1.88	2.61	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	16	
14	28	14.70	271.0	8.44	64.0	6.08	25.8	3.29	2.09	1.68	2.34	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	18	
16	32	16.79	348.0	9.64	80.0	6.87	31.5	4.00	2.49	1.97	2.71	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	20	
18	36	18.88	435.0	10.85	99.0	7.66	38.2	4.71	2.89	2.26	3.08	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	22
20	40	20.97	532.0	12.05	119.0	8.45	46.0	5.42	3.29	2.55	3.36	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	24
22	44	23.06	639.0	13.25	140.0	9.24	54.9	6.13	3.69	2.81	3.64	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	26
24	48	25.15	756.0	14.45	162.0	10.03	64.8	6.84	4.09	3.12	3.91	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	28
26	52	27.24	883.0	15.65	185.0	10.82	75.7	7.55	4.49	3.44	4.18	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	30
28	56	29.33	1020.0	16.85	209.0	11.61	87.6	8.26	4.89	3.77	4.37	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	32
30	60	31.42	1167.0	18.05	234.0	12.40	100.5	8.97	5.29	4.10	4.56	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	34
32	64	33.51	1324.0	19.25	260.0	13.19	114.4	9.68	5.69	4.43	4.75	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	36
34	68	35.60	1491.0	20.45	287.0	13.98	129.3	10.39	6.09	4.76	4.94	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	38
36	72	37.69	1668.0	21.65	315.0	14.77	145.2	11.10	6.49	5.01	5.13	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	40
38	76	39.78	1855.0	22.85	344.0	15.56	162.1	11.81	6.89	5.32	5.32	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	42
40	80	41.87	2052.0	24.05	374.0	16.35	180.0	12.52	7.29	5.63	5.51	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	44
42	84	43.96	2259.0	25.25	405.0	17.14	198.9	13.23	7.69	5.94	5.70	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	46
44	88	46.05	2476.0	26.45	437.0	17.96	218.8	13.96	8.09	6.25	5.89	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	48
46	92	48.14	2703.0	27.65	470.0	18.78	239.7	14.71	8.44	6.56	6.08	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	50
48	96	50.23	2940.0	28.85	504.0	19.61	261.6	15.47	8.79	6.87	6.27	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	52
50	100	52.32	3187.0	30.05	539.0	20.44	284.5	16.24	9.14	7.18	6.46	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	54
52	104	54.41	3444.0	31.25	575.0	21.27	308.4	17.02	9.49	7.47	6.65	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	56
54	108	56.50	3711.0	32.45	612.0	22.10	333.3	17.81	9.84	7.76	6.84	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	58
56	112	58.59	3988.0	33.65	650.0	22.93	359.2	18.61	10.19	8.05	7.03	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	60
58	116	60.68	4275.0	34.85	689.0	23.76	386.1	19.42	10.54	8.34	7.22	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	62
60	120	62.77	4572.0	36.05	729.0	24.59	414.0	20.23	10.89	8.63	7.41	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	64
62	124	64.86	4879.0	37.25	770.0	25.42	442.9	21.06	11.24	8.92	7.60	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	66
64	128	66.95	5196.0	38.45	812.0	26.25	472.8	21.89	11.59	9.21	7.79	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	68
66	132	69.04	5523.0	39.65	855.0	27.08	503.7	22.73	11.94	9.52	7.98	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	70
68	136	71.13	5860.0	40.85	900.0	27.87	535.6	23.57	12.29	9.83	8.17	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	72
70	140	73.22	6207.0	42.05	947.0	28.66	568.5	24.41	12.64	10.14	8.36	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	74
72	144	75.31	6564.0	43.25	996.0	29.45	602.4	25.25	12.99	10.45	8.55	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	76
74	148	77.40	6931.0	44.45	1047.0	30.24	637.3	26.09	13.34	10.76	8.74	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	78
76	152	79.49	7308.0	45.65	1100.0	31.03	673.2	26.93	13.69	11.07	8.93	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	80
78	156	81.58	7695.0	46.85	1155.0	31.82	710.1	27.77	14.04	11.38	9.12	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	82
80	160	83.67	8092.0	48.05	1212.0	32.61	748.0	28.61	14.39	11.69	9.31	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	84
82	164	85.76	8509.0	49.25	1271.0	33.40	786.9	29.45	14.74	12.00	9.50	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	86
84	168	87.85	8936.0	50.45	1332.0	34.19	826.8	30.29	15.09	12.31	9.69	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	88
86	172	89.94	9383.0	51.65	1395.0	34.98	867.7	31.13	15.44	12.62	9.88	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	90
88	176	92.03	9840.0	52.85	1460.0	35.77	909.6	31.97	15.79	12.93	10.07	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	92
90	180	94.12	10307.0	54.05	1527.0	36.56	952.5	32.81	16.14	13.24	10.26	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	94
92	184	96.21	10784.0	55.25	1596.0	37.35	997.4	33.65	16.49	13.55	10.45	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	96
94	188	98.30	11271.0	56.45	1667.0	38.14	1043.3	34.49	16.84	13.86	10.64	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	98
96	192	100.39	11768.0	57.65	1740.0	38.93	1090.2	35.33	17.19	14.17	10.83	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100

La tabla Nº 2 nos señala las pérdidas por fricción de la columna.
 Su total, comprende las disminuidas a la potencia del motor, a la bomba
 seleccionada, siendo éstas por desdiferencia, por fricción, y por la variabilidad
 de operación del motor al revolucionarse



centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería · unam

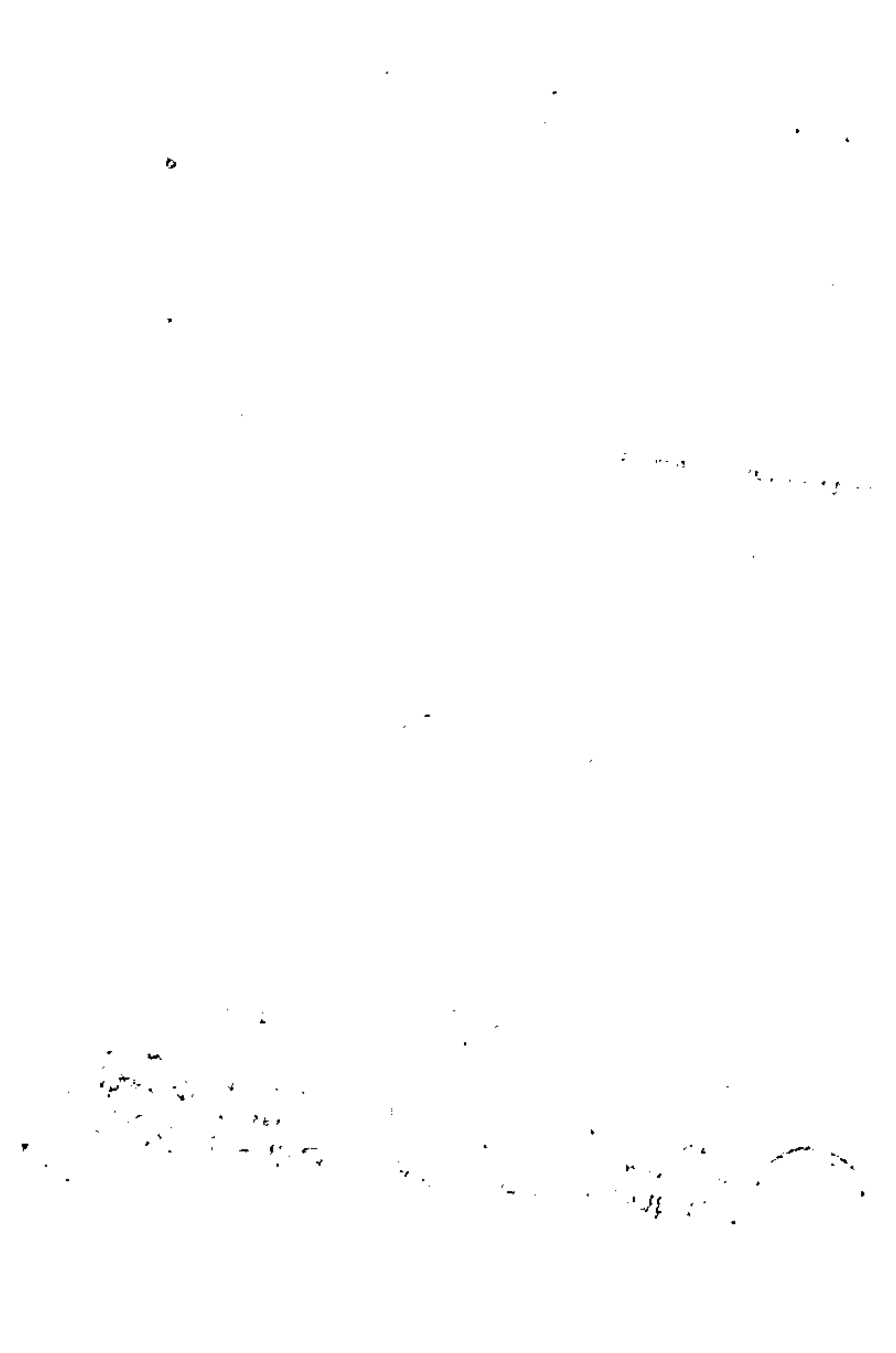


EXPLOTACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS DE AGUA
SUBTERRANEA

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

Ing. Armando G. Canales Elordy

julio, 1980



HIDROLOGIA SUBTERRANEA
I N D I C E

- 1.- DEFINICION DE TERMINOS
- 2.- ELEMENTOS NECESARIOS PARA LA EVALUACION
 - 2.1- Comportamiento de los acuíferos
 - 2.2- Interpretación de datos piezométricos Ley de Darcy
 - 2.3- Hidrometría subterránea
 - 2.4- Características hidráulicas de los acuíferos
 - 2.5- Balace de agua subterránea
- 3.- TEORIA DEL FLUJO DEL AGUA SUBTERRANEA, HIDRAULICA DE POZOS
 - 3.1- Ecuación fundamental de conservación de la masa
 - 3.2- Pruebas de bombeo
 - 3.3- Flujo radial a un pozo en régimen establecido
Pruebas de bombeo en régimen transitorio
- 4.- INTRUSION SALINA
- 5.- MANEJO DE ACUIFEROS
 - 5.1- La explotación del agua subterránea en México, estrategia para su manejo adecuado
 - 5.2- Extracción permanente y explotación racional del almacenamiento
 - 5.3- Recarga artificial
- 6.- ANALISIS DE LA CURVA DE RECESION O DECAIMIENTO DE UN HIDROGRAMA

* Notas preparadas con la colaboración de los Ingenieros: Rubén Chávez, Jaime Tinajero G., Armando G. Canales E. y de Mario Domínguez B.

3 DEFINICION DE TERMINOS. (ref. 1, 7)

A continuación se presentan algunas definiciones que son necesarias en la teoría del flujo del agua Subterránea. Las primeras son relaciones entre volúmenes que se expresan como fracciones decimales o como porcentos.

POROSIDAD de una roca o de un suelo es su propiedad de contener intersticios o huecos.

$$n = \frac{V_v}{V_o} \quad \text{donde } n: \text{porosidad.}$$

V_v : Volumen de vacios que pueda estar ocupado por agua, gases y materia orgánica.
 V_o : Volumen total de la muestra.

La Porosidad efectiva se refiere a la magnitud del poro, al espacio disponible para la transmisión del fluido. Es la relación de intersticios interconectados a volumen total.

GRADO DE SATURACION, es la relación entre el volumen de agua y el volumen de poros en una muestra.

$$G = \frac{V_w}{V_v} \quad \text{donde } G: \text{grado de saturación}$$

V_w : Volumen de agua
 V_v : volumen de vacios, ya definido antes.

CONTENIDO VOLUMETRICO DE HUMEDAD.

$$c = \frac{V_w}{V_o} \quad \text{donde } c: \text{contenido volumétrico de humedad}$$

V_w : volumen de agua
 V_o : volumen total de la muestra.

RENDIMIENTO ESPECIFICO. Se obtiene del volumen de agua que, después de saturada la roca o suelo, escurre por gravedad, dividido entre el volumen de la muestra.

$$S_y = \frac{V_d}{V_o} \quad \text{donde } S_y: \text{rendimiento específico}$$

V_d : volumen drenado por gravedad.
 V_o : volumen total de la muestra.

Con ayuda de otros términos que se definen más adelante, se dará una definición de mayor aplicación.

RETENCION ESPECIFICA. Con respecto al anterior corresponde en forma complementaria a la relación del volumen de agua que, en una roca saturada, queda retenido contra la acción de la gravedad, entre el volumen de roca.

$$S_r = \frac{V_r}{V_o} \quad \text{donde } S_r: \text{retención específica}$$

V_r : volumen retenido
 V_o : volumen de la muestra

DENSIDAD, es la masa que corresponde a la unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V_0} \quad \text{donde } \rho: \text{ densidad ML}^{-3} \text{ ó FL}^{-4} \text{ T}^2$$

m: masa M

V_0 : volumen total de la muestra L^3

PESO ESPECIFICO: es el peso de la unidad de volumen de un fluido.

$$\gamma = \frac{W}{V_0} \quad \text{donde } \gamma: \text{ peso específico FL}^{-3}$$

W : peso total de la muestra F

V_0 : volumen de la muestra L^3

Se tienen las siguientes relaciones:

$$\gamma = \frac{mg}{V_0}$$

$$\gamma = \rho g$$

También

$$n = S_y + S_r$$

A continuación se presenta un cuadro con los rangos de porosidad y rendimiento específico de algunas rocas (ref.3)

ROCA	n	S_y
	%	%
Arcilla	45-55	1-10
Arena	35-40	10-30
Grava	30-40	15-30
Arena y grava	20-35	15-25
Arenisca	10-20	5-15
Lutita	1-10	0.5-5
Caliza	1-10	0.5-5

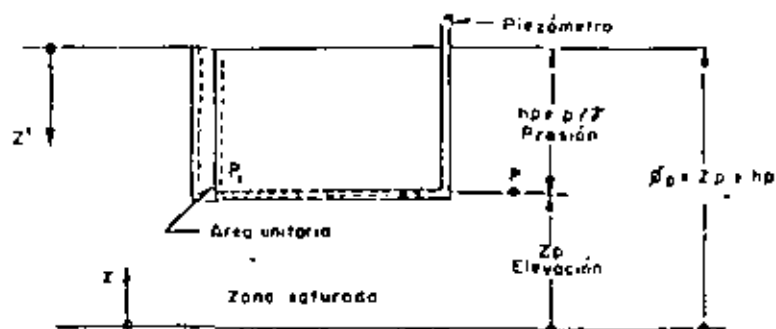


Fig. 1.1

Potencial piezométrico y la zona saturada

La presión que experimenta el agua en los intersticios de un medio poroso, se le llama presión de poro.

Presión total = Presión de poro + presión intergranular.

La presión intergranular es el esfuerzo en el esqueleto granular.

La presión de poro se puede medir con un piezómetro instalado como se muestra en la figura 1.1 donde la cotaación h_p , se conoce como carga de presión y se mide a partir del punto en consideración.

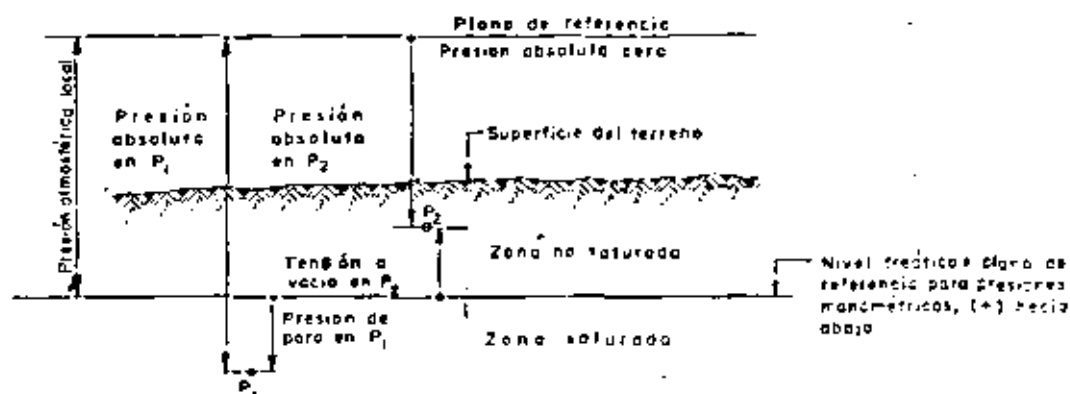


FIG. 1 - 2

Tomando en cuenta la elevación z_p , denominada carga de posición medida con respecto a un plano de referencia, se tiene:

$$\psi = h_p + z_p$$

ψ : elevación piezométrica.

La carga de presión equivale a la presión manométrica que sumada a la presión atmosférica local da la presión absoluta, como se ilustra en la figura 1-2.

En la zona saturada todos los huecos están idealmente llenos de agua. El nivel freático es la superficie que se encuentra a presión atmosférica y la franja capilar se define como la zona inmediata al nivel freático, encontrándose saturada bajo presión negativa, tensión o succión y tiene como límite superior a la superficie libre, por lo que ésta es el límite de la zona no saturada o zona de aereación que se encuentra a partir de la superficie del terreno.

Esta zona se divide en tres: zona de agua superficial, intermedia y zona capilar (ref 2).

La franja capilar se puede determinar mediante un cilindro de suelo que se satura y se deja drenar por gravedad durante una semana, protegido contra la evaporación. Se mide el contenido volumétrico de humedad a distintas profundidades y se traza la curva mostrada en la fig. 1-3.

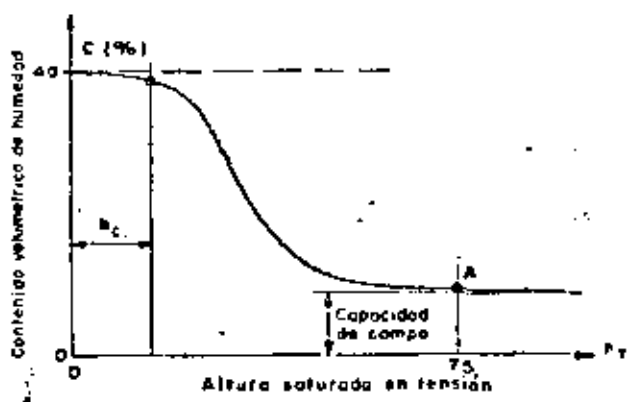


Fig. 1.3

La curva de la fig. 1-4 relaciona el grado de saturación y contenido de humedad de una arena con la altura a partir del nivel freático.

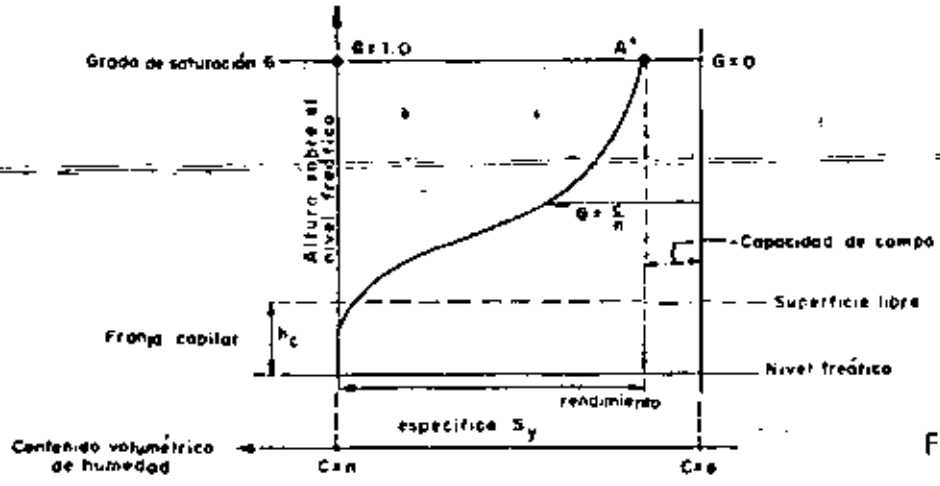


Fig. 1.4

El agua subsuperficial (Meinzer 1959) es la que se encuentra en los intersticios de las rocas. La parte de esa agua que se encuentra en los intersticios completamente saturados que se mueve bajo la acción de la gravedad y de presiones hidrodinámicas, se denomina agua subterránea o gravitacional.

Se llama agua vadosa la subsuperficial que se halla en la Zona de Aereación. Esta denominación ha adquirido distintos sentidos (ref. 1) por lo que aquí se utilizarán en la forma descrita, incluyendo además:

Vapor de agua. Llena completamente los vacíos entre las partículas de suelo, desplazándose de zonas de mayor a menor presión.

Agua higroscópica: al contacto con aire húmedo condensa en las partículas de suelo secas, las que absorben la humedad e incrementan el volumen de suelo.

Agua pelicular: se retiene en las partículas de suelo por fuerzas moleculares de adherencia sin que pueda ser desplazada por fuerzas centrífugas con aceleraciones muy superiores a las de gravedad.

Acuífero es una formación geológica que permite la circulación y almacenamiento del agua, siendo factible su aprovechamiento en forma continua y económica. Puede decirse que es una formación, conjunto de formaciones o parte de ellas que contiene suficiente material permeable saturado para proporcionar cantidades significativas de agua a pozos y manantiales.

Capa Semiconfinante: formación geológica semipermeable que trasmite el agua lentamente y que en grandes extensiones puede traducirse en una aportación significativa a los acuíferos adyacentes.

Capa Confinante: formación geológica que puede o no contener agua, su permeabilidad es prácticamente nula y constituye una frontera.

Acuífero libre o freático es aquel en el cual el agua subterránea, tiene una superficie que se denomina nivel freático, la que se caracteriza por estar sometida a la presión atmosférica.

Acuífero artésiano es aquel donde el agua está confinada a presión por formaciones semiconfinantes o confinantes suprayacentes. Los niveles piezométricos se encuentran sobre el límite superior del acuífero.

Como se muestra en la fig. 1-5 se puede tener un acuífero artésiano confinado o semiconfinado según esté limitado por una capa confinante o por una semiconfinante respectivamente.

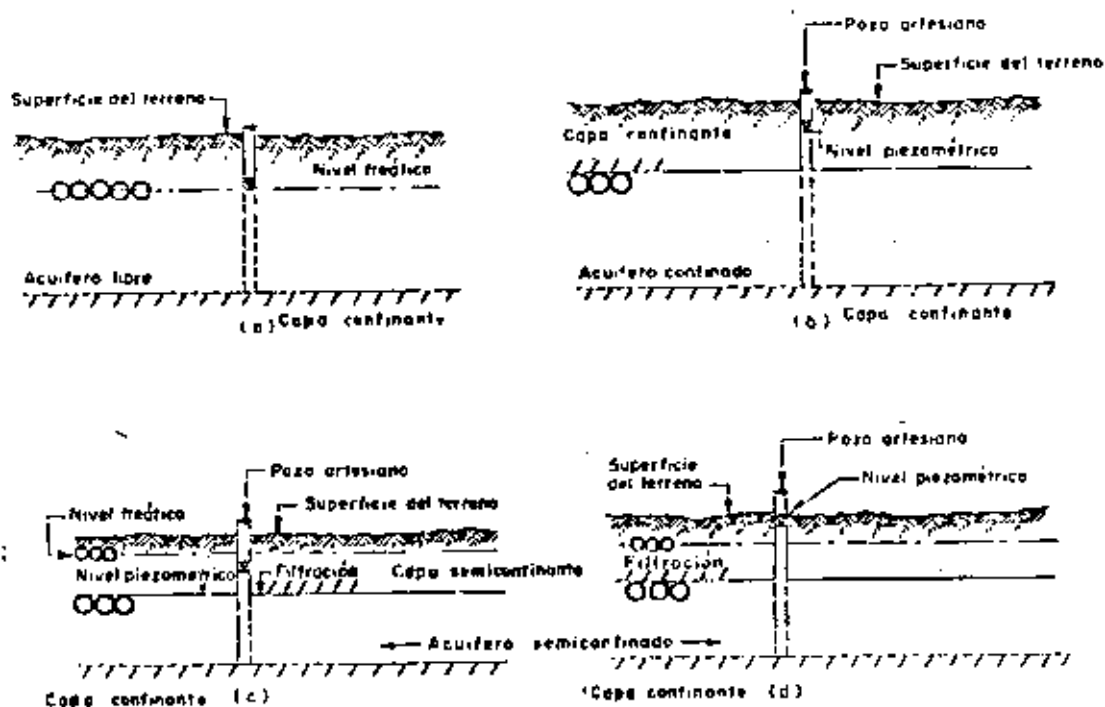


Fig. 1 - 5

Cuando el nivel piezométrico en un pozo que capta un acuífero artésiano rebasa la superficie del terreno se tiene un pozo fuente.

La superficie imaginaria que determinan los niveles en los pozos que captan el acuífero artésiano se le denomina superficie piezométrica.

El coeficiente de almacenaje. Se define como el volumen de agua que un acuífero cede o toma en almacenamiento por unidad de área (en planta) cuando la carga piezométrica se abate o recupera una unidad. Fig. 1-6

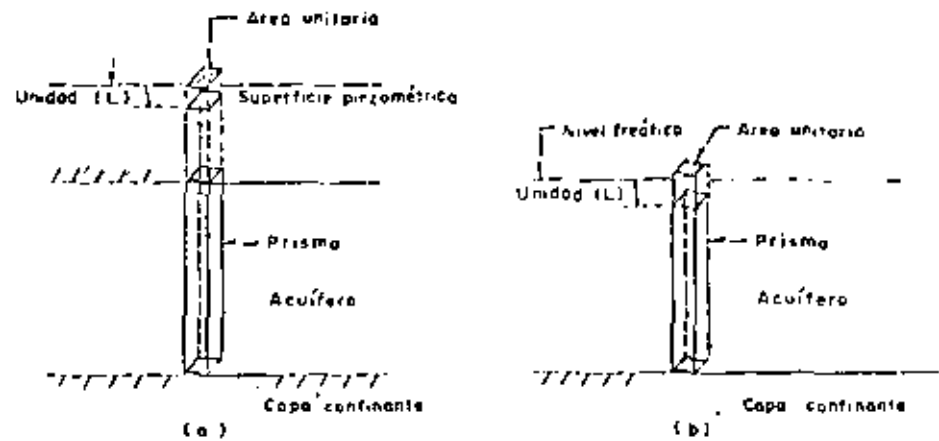


Fig. 1.6

En un acuífero libre, el coeficiente de almacenaje es igual al rendimiento específico S_y , si el drenado es completo. La definición de rendimiento específico es la relación del volumen de agua que es liberado o añadido al almacenamiento con respecto al volumen de roca, en una unidad de área (horizontal) de acuífero, cuando el nivel freático se abate o se recupera una unidad

rangos aproximados

En acuíferos libres $0.02 \leq S \leq 0.30$

En acuíferos artesianos $0.00001 \leq S \leq 0.001$

El coeficiente de almacenaje específico (S_y) es el volumen de agua que un acuífero cede o toma en almacenamiento por unidad de volumen (en planta) cuando la carga piezométrica se abate o recupera una unidad.

$S = S_y b$, b: espesor del acuífero.

La permeabilidad es una medida de la facilidad que tiene el agua de moverse en acuíferos y capas semiconfinantes.

El coeficiente de permeabilidad (K) de campo de un acuífero se ha definido como el caudal ($\frac{L}{T}$) que cruza a través de un área unitaria bajo el gradiente hidráulico unitario (de 1 m / 1 m)

K : conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad o permeabilidad efectiva (Ref. 6)

$$K = k \frac{g}{\nu} \quad , \quad (L/T)$$

$$k = C d^2 \quad , \quad C. \text{ factor de forma} \text{---}$$

d: ϕ poros

k = permeabilidad intrínseca (independiente del fluido)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \gamma = \rho g$$

ν : viscosidad cinemática $L^2 T^{-1}$

γ : peso específico $[F L^{-3}]$
gravitacional absoluto

ρ : densidad $[F L^{-4} T^{+2}] [M L^{-3}]$

μ : viscosidad dinámica $[F T L^{-2}] [M L^{-1} T^{-1}]$

g : aceleración de la gravedad

K determinarla en laboratorio o por medio de bombeo (mejor)

Formación que contenga arcilla:

Con aire, no hay expansión de arcilla; con agua salada, poca expansión de arcilla; con agua dulce, mayor.

Por lo tanto va disminuyendo la permeabilidad.

El coeficiente de Transmisividad (T) es la capacidad del acuífero de transmitir agua a través de todo su espesor

$$T = Kb$$

Se puede interpretar como el caudal a través de una franja vertical del acuífero de una unidad de ancho por el espesor saturado y bajo un gradiente unitario a la temperatura del agua reinante.

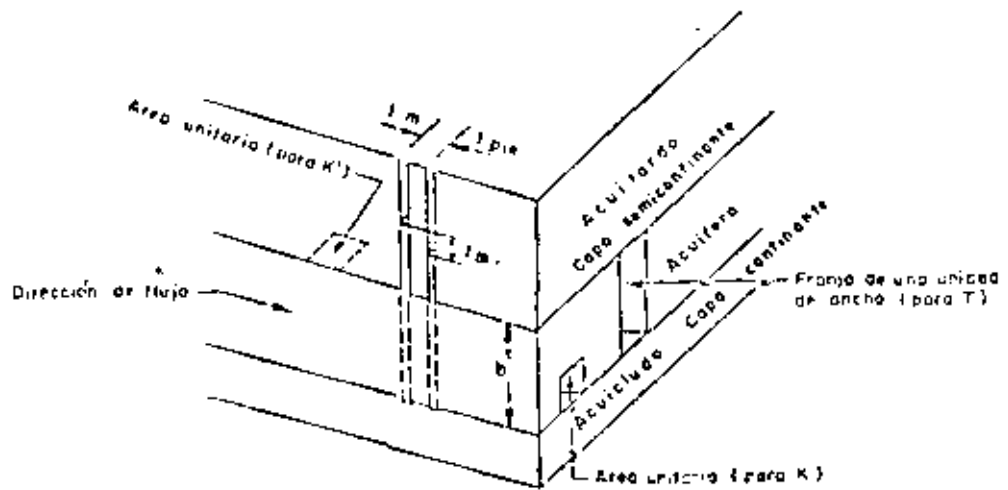


Fig. 1-7

El coeficiente de permeabilidad K' de una capa semiconfinante se definió como el caudal vertical de agua a través de una sección horizontal de área unitaria bajo un gradiente vertical unitario.

2 ELEMENTOS NECESARIOS PARA LA EVALUACION

2.1 Comportamiento de los acuíferos

Todo acuífero tiene un mecanismo natural de recarga y descarga, que puede ser modificado mediante recarga y/o descarga artificiales.

La recarga natural del acuífero ocurre por la infiltración de agua de lluvia en formaciones permeables; aunque no todo el agua que se infiltra llega al acuífero debido a que, como se verá más adelante, una parte de ella es retenida por las formaciones que se encuentran arriba del nivel freático. El acuífero puede ser recargado también artificialmente, mediante la infiltración de agua a través de obras construidas con ese fin.

La descarga natural del acuífero puede ocurrir en forma de manantiales, por flujo hacia un río o por evapotranspiración en zonas con nivel freático somero. La descarga artificial tiene lugar a través de captaciones de agua subterránea: pozos y galerías.

El agua se mueve en el acuífero, de las zonas de recarga a las de descarga, siguiendo las trayectorias de menor resistencia y a una velocidad que depende de la permeabilidad de las rocas y de la pendiente de la superficie piezométrica. La velocidad puede variar desde unos cuantos centímetros por año en materiales arcillosos, hasta varios cientos de metros por año en gravas; aunque en algunas rocas volcánicas y calizas, la velocidad puede llegar a ser de varios kilómetros por año.

El conocimiento de la configuración y evolución de la superficie piezométrica, indispensable para estudiar el comportamiento, cuantificar la recarga y planear el aprovechamiento del acuífero, requiere de la observación continua de los niveles estáticos del acuífero, en pozos distribuidos en el área estudiada. Se llama nivel estático, al nivel de agua subterránea no afectado por el bombeo en el pozo observado o en pozos próximos a él. Debido a la heterogeneidad de los materiales en el subsuelo, y a que el flujo subterráneo no es completamente horizontal, sino que pueden existir componentes significativas de flujo vertical, la altura piezométrica puede ser variable con la profundidad. El nivel estático de un pozo es un promedio pesado de las alturas piezométricas de los diferentes estratos captados por el pozo.

Dada la importancia que tienen los datos piezométricos en el estudio cuantitativo de agua subterránea, debe tenerse cierto cuidado al obtenerlos, pues la medición de un nivel estático puede ser afectada por numerosos factores que la invalidan.

2.2. Interpretación de datos piezométricos. Ley de Darcy. •

Para su interpretación, los datos piezométricos se representan gráficamente en diferentes formas. Las representaciones más útiles son: configuración piezométrica, evoluciones piezométricas, planos de profundidades al nivel del agua, perfiles piezométricos e hidrógrafos de pozos.

Configuraciones piezométricas.

Una configuración piezométrica representa la forma de la superficie piezométrica en un acuífero confinado o semiconfinado, y la forma de la superficie freática en un acuífero libre. Las configuraciones se preparan con base en los niveles estáticos referidos a un plano horizontal, generalmente el nivel medio del mar. El procesamiento consiste en trazar curvas de igual elevación piezométrica, interpolando entre valores conocidos.

La preparación de estas configuraciones tiene un problema principal; por su aparente sencillez se le considera a menudo como una simple interpolación mecánica que no requiere de ningún criterio. Esto lleva a cometer errores que pueden invalidar la configuración resultante: se apoya la configuración en todos los valores indiscriminadamente, sin previa depuración; no se toma en cuenta el efecto de aquellos factores que pueden influir en el flujo del agua subterránea y, por tanto, en la forma de la superficie piezométrica, etc.

En primer lugar, entonces, es necesaria una depuración de los datos, ya que pueden estar afectados en varias formas; por ejemplo: un nivel de agua detectado puede estar influenciado por el bombeo en el propio pozo o en pozos vecinos, y no ser representativo del estático; un falso contacto de la sonda o una medición equivocada de la longitud de cable introducido para lograr el contacto, puede llevar a un nivel estático totalmente falso. Errores de este tipo pueden ser detectados, algunas veces, con los hidrógrafos de los pozos.

En otras ocasiones, el error no está en la medición, sino en ligar en la configuración niveles estáticos correspondientes a pozos que están captando acuíferos diferentes. Para evitar ésto, es conveniente contar con secciones geológicas que muestren las principales unidades geohidrológicas existentes en el subsuelo; asimismo, deben conocerse las características constructivas (profundidad, ubicación de cordozos, ...) de los pozos de observación para definir el acuífero en que se encuentran. En caso de existir varios acuíferos, será necesario preparar una configuración piezométrica para cada uno de ellos.

Una vez corregidos o eliminados los datos poco confiables, se procede a la interpretación para definir las curvas de igual elevación de nivel estático, las cuales deben trazarse tomando en cuenta todos los factores hidrológicos y geológicos que pueden influir en la forma de la superficie piezométrica. Para esto es conveniente preparar las configuraciones en un plano base en el que se indique la topografía aproximada, afloramientos geológicos, ríos, lagunas, manantiales, zonas empantanadas, pozos, etc.

Las configuraciones así obtenidas proporcionan información respecto a las direcciones de flujo, localización de zonas de recarga y descarga, gradientes hidráulicos, comportamiento de las fronteras, efectos de la explotación, etc.

Por otra parte, las configuraciones piezométricas son básicas para la cuantificación de caudales de flujo subterráneo. Esta cuantificación se basa en el concepto de "red de flujo" y en la Ley de Darcy.

Se puede demostrar matemáticamente que el agua subterránea sigue trayectorias representadas gráficamente por líneas normales a las curvas de igual elevación de nivel estático (también llamadas equipotenciales), a las cuales se les da el nombre de líneas de flujo. A la malla formada por las líneas equipotenciales y las líneas de flujo, se le llama red de flujo.

En 1856, Darcy estableció las bases del estudio cuantitativo del agua subterránea al formular la ley que lleva su nombre: la velocidad de flujo a través de un medio poroso es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria de flujo, o sea la velocidad del flujo a través del medio poroso es directamente proporcional a la potencia del gradiente hidráulico. Esta ley se expresa matemáticamente:

$$V = K \frac{h}{L} = Ki,$$

en la que V es la velocidad media de flujo, h es la pérdida de carga en la distancia L , i es el gradiente hidráulico y K es el coeficiente de permeabilidad.

Con base en el principio la conservación de la masa (ref- 8) y en la expresión anterior, puede cuantificarse el caudal de flujo que circula a través de una sección (canal de flujo) limitada por dos líneas de flujo y dos curvas equipotenciales, en la forma siguiente:

$$Q_j = Av = KA \frac{h}{L}$$

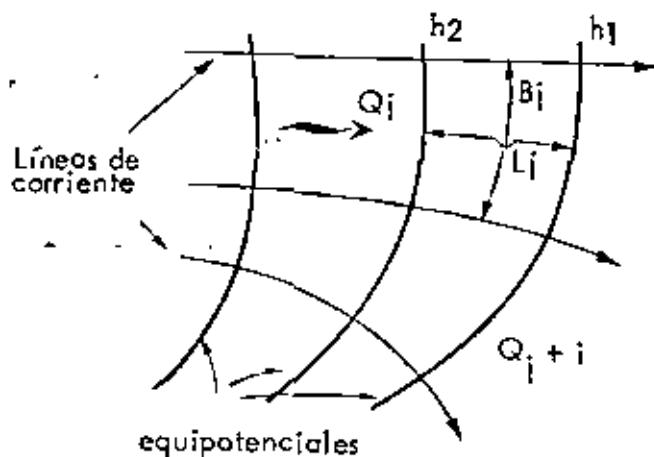
en la que A es el área de flujo. Utilizando el concepto de transmisividad la expresión anterior queda:

$$Q = T.B. \frac{h}{L}$$

en la que T es la transmisividad y B es el ancho medio de flujo.

Los valores de B y L son medidos directamente en la red de flujo - como se muestra en la fig. 2.2.1.

Es importante destacar que la ley de Darcy se refiere a una velocidad media y área total de sección transversal que difieren de las reales. Estas dependen del acomodo y diámetro de las partículas sólidas que constituyen el acuífero.



$$h_2 - h_1 = h$$

$$Q_i = T_i B_i \frac{h}{L_i}$$

Q_i = caudal a través del canal i

T_i = transmisividad en la sección de valuación

B_i = ancho del canal i

L_i = separación de equipotenciales en la sección de valuación

Fig. 2.2.1 Cálculo del flujo subterráneo

El límite de aplicabilidad de la Ley de Darcy se obtuvo mediante experimentos realizados en arenas naturales y artificiales, los cuales señalan que el alejamiento del flujo laminar se presenta entre valores del número de Reynolds de 1 a 10

$$R = \rho V \frac{dm}{\mu} \qquad R = \frac{Vdm}{\nu}$$

donde

R : número de Reynolds

ρ : densidad

V : velocidad real

μ : viscosidad dinámica

ν : viscosidad cinemática

dm : diámetro medio que Hazen (1893) propuso como el del grano tal, que el 10% del material del acuífero (en peso) sea menor y que el 90% sea mayor.

En la mayoría de los casos $R < 1$, para flujo natural de agua subterránea y la ley de Darcy es aplicable. En grietas, fracturas ó en la proximidad de los pozos se requiere efectuar correcciones por turbulencia.

Evolución Piezométrica

La evolución de los niveles freáticos (o piezométricos) de un acuífero, en un intervalo de tiempo dado, se representa gráficamente por medio de curvas de igual evolución de nivel estático, apoyadas en las evoluciones observadas en pozos. En este caso debe evitarse, también, la extrapolación mecánica de los datos básicos; de igual manera, es necesario depurar los datos antes de utilizarlos, pues un error de los mencionados anteriormente, puede dar lugar a que las curvas obtenidas no representen en absoluto la evolución piezométrica ocurrida. Al trazar las curvas deben tomarse en cuenta todos los factores que pueden influir en la evolución: zonas de bombeo, zonas de recarga y descarga, forma de la superficie freática (o piezométrica), tipo de acuífero (confinado o libre), etc.

Las curvas de igual evolución de nivel estático son de gran utilidad para definir áreas de abatimiento o ascenso de los niveles estáticos; proporcionan información para valuar los cambios de almacenamiento experimentados por el acuífero; permiten apreciar relaciones entre el bombeo y las fluctuaciones de los niveles estáticos del

acuífero, y son básicas para la calibración de un modelo de simulación del comportamiento de un acuífero.

2.3 Hidrometría Subterránea

Es una información que tiene importancia, pues representa un término muy significativo en la evaluación de la potencialidad de los acuíferos. Salvo contadas excepciones, en la República Mexicana se carece de un control adecuado de los volúmenes extraídos de los acuíferos mediante el bombeo de pozos. Se ha venido insistiendo en la necesidad de que cada pozo cuente con un medidor totalizador de flujo en la descarga, con lo que se obtendría no sólo el volumen total bombeado en determinado período, sino también su distribución en el área de estudio.

Actualmente se recurre a diversos métodos de estimación indirecta para obtener los volúmenes de extracción:

- 1.- Superficie de cultivo y lámina de riego
- 2.- Consumo de energía eléctrica relacionado al caudal.
- 3.- Conocimiento de las horas de bombeo y del caudal del pozo, por ejemplo mediante: reloj que acumula horas de trabajo del motor; Registro de arranque y suspensión del bombeo llevado por el bombero.
- 4.- Agrupando los pozos del mismo diámetro de descarga y el mismo uso, realizando un muestreo estadístico para determinar en esta forma el volumen de cada grupo.

Cualquier otra iniciativa y métodos que se sugieran que den una mejor aproximación a la realidad del volumen extraído, serán de aceptarse.

2.4 Características hidráulicas de los acuíferos

Los principales valores de las propiedades de los acuíferos empleados en la cuantificación del agua subterránea son la transmisividad y el coeficiente de almacenaje.

En algunos sistemas acuíferos del tipo semiconfinado interesa también la permeabilidad en sentido vertical de los estratos semiconfinantes.

Las definiciones de estos conceptos fueron ya expuestas en (1) y sus valores se pueden obtener aplicando la hidráulica de pozos, que se desarrolla en el capítulo siguiente.

2.5 Balance de Agua Subterráneo

La evaluación de la potencialidad de un acuífero debe realizarse mediante un método que trabaje directamente con el acuífero, con el agua ya infiltrada y relativamente al margen de los fenómenos que ocurren en la superficie. Este método recibe el nombre de "balance de agua subterránea",

Un acuífero es un recipiente subterráneo que tiene recargas, descargas y un cierto almacenamiento. Como respuesta a la acción combinada de las recargas y descargas, el nivel del agua del recipiente varía, descendiendo si la recarga es menor que la descarga, y ascendiendo, en caso contrario. La recarga, la descarga y las variaciones en el almacenamiento, en un intervalo de tiempo dado, están relacionadas por un principio universal: el principio de la conservación de la materia. El balance de agua subterránea se basa en este principio, y tiene como finalidad principal la determinación del volumen de recarga de un acuífero.

Ecuación de Balance.

A la ecuación que expresa el principio de conservación de la materia, aplicado a un acuífero, o porción del mismo, se le llama "ecuación de balance de agua subterránea". En su forma más simple, esta ecuación es:

$$\text{Recarga} - \text{Descarga} = \text{Cambio de Almacenamiento.}$$

Ahora bien: tanto la recarga como la descarga ocurren en diferentes formas. La recarga puede ocurrir por flujo subterráneo (E_h) y/o por recarga vertical neta en el área de balance (R). La descarga puede tener lugar por flujo subterráneo (S); aflorando en forma de manantiales, o a una corriente superficial (D); mediante pozos de bombeo (B), y por evapotranspiración en zonas con nivel freático somero (E_v).

Si llamamos V al cambio en almacenamiento, la ecuación puede expresarse también como sigue:

$$E_h + R - S_h - D - B - E_v = V \quad \text{--- (2.5.1)}$$

La expresión (2.5.1) es la ecuación general del balance de agua subterránea. En cada caso, según el mecanismo de recarga y descarga del acuífero en estudio y del intervalo de tiempo seleccionado para plantear el balance, cada uno de los términos de (2.5.1) podrá o no, aparecer. Por ejemplo, si se trata de un acuífero limitado totalmente por fronteras impermeables, los términos E_h y S_h no aparecerán, ya que no existe entrada ni salida por flujo subterráneo. Si se trata de un solo acuífero que no tiene descarga por evapotranspiración ni por afloramientos, los términos D y E_v serán suprimidos de la ecuación. Por otra parte, la ecuación de balance para un mismo acuífero podrá variar de un intervalo de tiempo a otro: la ecuación correspondiente a un período de estiaje, y sin agua superficial en la red de canales no incluirá el término R , mientras que la correspondiente a un período lluvioso, y de riego con agua superficial sí lo incluirá.

La recarga vertical R del acuífero en estudio se denominó neto para incluir las aportaciones por infiltración de aguas superficiales, mas la alimentación y menos la descarga ocasionada por acuíferos adyacentes.

En todos los casos, es necesario tener una idea más o menos clara del comportamiento del acuífero, para plantear su ecuación de balance.

Area de Balance.

El área utilizada para efectuar el balance de agua subterránea depende de varios factores: por una parte, lo ideal sería efectuar el balance para todo el acuífero (valle, planicie) a fin de conocer su potencialidad total; sin embargo, esto no siempre es posible, debido a que la aplicación del balance requiere del conocimiento del comportamiento del acuífero, observado en pozos los cuales no siempre se encuentran distribuidos en toda el área, sino sólo en una porción de la misma. Por consiguiente, en muchas ocasiones el área de balance tiene que limitarse al área con datos disponibles.

Otras veces, aún cuando se dispone de información acerca del comportamiento y características de todo el acuífero, puede interesar, por alguna razón, conocer especialmente el funcionamiento y potencialidad de una porción del mismo. En este caso el área de balance se limitará a esa porción.

El área de balance puede estar limitada por fronteras reales, geológicas e hidrológicas, tales como afloramientos o masas de agua (mar, lagos, etc.), y por fronteras virtuales, imaginarias.

Cuantificación de los Términos de la Ecuación de Balance.

Una vez seleccionada el área de balance se procede a valorar los términos de la ecuación.

Los volúmenes de entrada y salida por flujo subterráneo, E_h y S_h , se obtienen multiplicando los caudales de flujo que pasan por el perímetro del área de balance, calculados como se indicó en (2.2.), por el intervalo de tiempo utilizado para plantear el balance. Es decir:

$$E_h = \sum_1^{ne} Q_j t = \sum_1^{ne} T_j B_j i_j t$$

en que T_j , B_j e i_j son la transmisividad, el ancho de flujo y el gradiente, del canal de flujo j , respectivamente; t es el intervalo de tiempo considerado para plantear el balance, y ne es el número de canales de flujo de entrada, definidos en la periferia del área de balance. En la misma forma se calcula S_h .

El volumen descargado por el acuífero a un río y en forma de manantiales, D , se cuantifica mediante estaciones de aforo para medir la descarga de los manantiales y el caudal base de las corrientes.

El volumen de bombeo, B , se puede obtener como se indicó en hidrometría subterránea. Cuando los niveles freáticos del acuífero en estudio se encuentren someros, (actualmente se diría a menos de 3 m de profundidad) una estimación poco aproximada de la descarga del acuífero por evapotranspiración, E_v , se tiene aplicando la evapotranspiración potencial medida al área en que está ocurriendo este tipo de descarga.

El cambio de almacenamiento se calcula a partir de la evolución piezométrica y del coeficiente de almacenamiento del acuífero. Mediante las curvas de igual evolución del nivel estático correspondientes al intervalo de tiempo seleccionado para plantear el balance, se calcula, en el caso de un acuífero libre, el volumen de acuífero drenado o saturado en dicho intervalo, y en el caso de un acuífero confinado, la variación total de

la presión. Este volumen o esta variación de presión multiplicados por el coeficiente de almacenaje respectivo, proporciona el cambio de almacenamiento. En algunos casos, el coeficiente de almacenaje es conocido mediante pruebas de bombeo, o inferido a partir del conocimiento de la geología subterránea; pero en otros, su valor regional es muy dudoso. Cuando ocurre esto último, el coeficiente de almacenaje se considera como una incógnita a despejar en la ecuación de balance.

La recarga vertical en el área estudiada, es un término que no puede obtenerse en forma directa, y sólo puede cuantificarse despejándolo de la ecuación. Para incluirla en la ecuación, o ecuaciones de balance, es necesario tener un conocimiento aproximado de la forma en que ocurre y de su distribución en el tiempo. Es necesario saber, por ejemplo, si la recarga al acuífero se concentra en unos cuantos meses del año, o si ocurre a lo largo de todo el año como en el caso de zonas agrícolas regadas con agua superficial, en las que los retornos de agua de riego y las pérdidas por infiltración en los canales, propician la alimentación prácticamente continua del acuífero.

Número de Ecuaciones de Balance.

Dado que la recarga es un fenómeno cíclico, se calcula su valor por ciclo; es decir, por año.

El número de ecuaciones de balance que deben plantearse, dependerá, en cada caso, del número de incógnitas a despejar. Si la única incógnita es la recarga, bastará con plantear una ecuación, que puede ser la correspondiente a un año o a la fracción del mismo en la que se considere que ocurre la recarga. La solución de la ecuación proporcionará la recarga anual buscada.

Si además de la recarga se tiene otra incógnita (un coeficiente de almacenamiento regional, por ejemplo), será necesario plantear dos ecuaciones, correspondientes a dos intervalos de tiempo independientes, que pueden ser dos fracciones complementarias de un año; por ejemplo, enero - junio y julio - diciembre, siempre y cuando la recarga vertical pueda considerarse proporcional a las dos fracciones del año.

En general, será necesario plantear tantas ecuaciones como incógnitas se tengan; aunque en la gran mayoría de los casos el número de incógnitas es de 1 a 2.

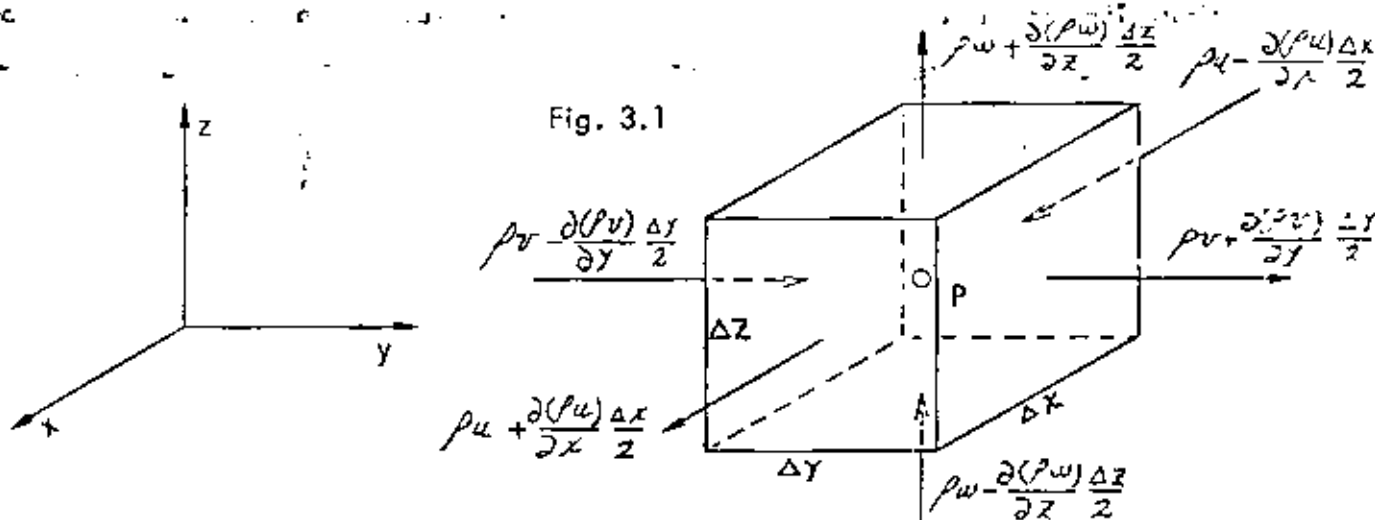
En cualquier caso, naturalmente, deberá contarse con la información necesaria para obtener los valores de los términos restantes de la ecuación, correspondientes a los intervalos de tiempo seleccionados; es decir, deberá contarse con las configuraciones piezométricas correspondientes al inicio y final de cada intervalo, y deberá conocerse la evolución piezométrica y el volumen descargado por el acuífero, en cada uno de dichos intervalos.

En general, una evaluación basada en la información correspondiente a un año, proporciona una idea preliminar de la recarga al acuífero y de las condiciones de explotación en que se encuentra el mismo. Sin embargo, como la recarga no es constante en el tiempo, sino que varía de un año a otro con la cuantía y distribución de la precipitación entre otros factores, es necesario obtener la recarga correspondiente a varios años con diferentes condiciones de precipitación, a fin de obtener una recarga media anual.

3.1. Ecuación Fundamental de Conservación de la Masa

Sea un paralelepípedo de medio poroso con fluido de densidad ρ , saturada. Las componentes de la velocidad o caudal por unidad de área se denominan u, v, w correspondiendo a la dirección y sentido de los ejes coordenados X, Y, Z , respectivamente.

En cada superficie del paralelepípedo se calcula el caudal que la cruza, refiriéndose al centro P y utilizando la expansión en serie de Taylor hasta la primera potencia. En la figura 3.1., se muestran los flujos de masa correspondientes.



El principio de conservación de la masa dice que la masa que entra es igual a la que sale más el cambio de almacenamiento en el tiempo.

De acuerdo con este principio sumamos los términos de entrada y de salida (con signo contrario) multiplicados por sus áreas.

$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.1.1)$$

Esta cantidad debe ser igual al cambio de masa en el tiempo. El flujo de masa almacenado en ΔV_0 es

$$\Delta M = n \rho \Delta X \Delta Y \Delta Z$$

n = porosidad

Por expansión o por compresión n y Z pueden variar

ρ varía con el tiempo y el lugar. Lateralmente las dimensiones del acuífero varían en cantidad despreciable.

$$\frac{\partial(\Delta M)}{\partial t} = \left[n \rho \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial t} + \rho \Delta Z \frac{\partial n}{\partial t} + n \Delta Z \frac{\partial \rho}{\partial t} \right] \Delta X \Delta Y \quad (3.1.2)$$

Expresando los términos del miembro derecho de la ecuación en función de las compresibilidades: α del acuífero y β del fluido y de p , la presión de poro.

La ecuación de continuidad queda:

$$-\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial X} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial Y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial Z} \right] = \rho(\alpha + n\beta) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3.1.3)$$

Tomando en cuenta que $h = Z + \frac{p}{\gamma} + \text{cte.}$ y que la ley de Darcy puede expresarse como:

$$u = -K \frac{\partial h}{\partial X} \quad v = -K \frac{\partial h}{\partial Y} \quad , \quad w = -K \frac{\partial h}{\partial Z}$$

Con la ecuación (3.1.3) en la que se desprecia $(u \frac{\partial \rho}{\partial X} + v \frac{\partial \rho}{\partial Y} + w \frac{\partial \rho}{\partial Z})$:

$$K \rho \left[\frac{\partial^2 h}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial Z^2} \right] + K \beta \rho^2 \left[\left(\frac{\partial h}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial Z} \right)^2 \right] = \rho^2 (\alpha + n\beta) \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\nabla^2 h = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta)$$

$\rho g \alpha$ = agua del almacenamiento debida a la compresión del esqueleto, intergranular por unidad de volumen de acuífero y por unidad de carga piezométrica.

$\rho g n\beta$: agua del almacenamiento debida a la expansión del agua por unidad de volumen de acuífero y por unidad de carga piezométrica.

como $S = S_y b$ y

$$T = K b$$

$$\nabla^2 h = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Para la condición de flujo permanente, la velocidad y por lo tanto la distribución de presión no cambia con el tiempo. De ahí que $\nabla^2 h = 0$.

conocida como ecuación de Laplace en un acuífero homogéneo e isotrópico con flujo permanente.

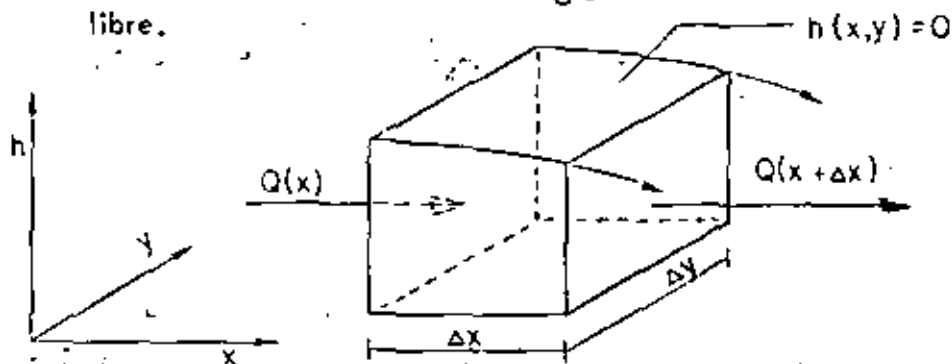
En un acuífero freático o no confinado

$$S = -s_y + \rho g (\alpha + n \beta)$$

donde el último término es despreciable con respecto al rendimiento específico s_y , considerando para efectos de la práctica $S \approx s_y$

Hipótesis de Dupuit para flujo no confinado.

1. En cualquier sección vertical el flujo es horizontal.
2. La velocidad es uniforme con la profundidad de flujo $Z_f(x)$
3. La velocidad en la superficie libre se puede expresar como $v = -K \frac{\partial h}{\partial x}$ en vez de $v = -K \cdot \frac{\partial h}{\partial s}$, aceptable para pendientes suaves de la superficie libre.



plano de referencia = límite superior de -

capa confinante.

La altura sobre el plano de referencia de un punto de la superficie libre coincide con el valor de su carga.

Con $K = \text{Cte.}$, la diferencia entre entrada y salida:

$$\Delta X \Delta Y K \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \Delta X \Delta Y K \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial h^2}{\partial x} \right)$$

análogamente con respecto al eje y.

Si no se genera ni pierde ningún volumen, no hay cambio de almacenamiento.

$$\Delta X \Delta Y \frac{K}{2} \left[\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} \right] = 0 \quad ; \quad \nabla^2 h^2 = 0$$

Si se tiene una recarga por infiltración w por unidad de área:

$$\Delta X \Delta Y \frac{K}{2} \left[\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} \right] + w \Delta X \Delta Y = 0$$

$$\nabla^2 h^2 + \frac{2w}{K} = 0$$

3.2. Pruebas de Bombeo

A una prueba de campo, tendiente a determinar las características hidráulicas de un acuífero, se le llama prueba de bombeo. La prueba consiste en observar los efectos (abatimientos) provocados en los niveles piezométricos de un acuífero por el bombeo de un pozo. Los abatimientos se observan en el pozo de bombeo y en pozos próximos.

La respuesta de los niveles del acuífero al bombeo, depende de las características hidráulicas del acuífero (permeabilidad, coeficiente de almacenamiento) y de las características físicas del sistema de flujo constituido por el pozo y el acuífero: - comportamiento de las fronteras laterales y verticales del acuífero, penetración del pozo, etc.

Cuando un pozo es bombeado, la superficie freática (o piezométrica) del acuífero es abatida en sus alrededores. El abatimiento provocado es máximo en el pozo de bombeo y decrece conforme aumenta la distancia al pozo, hasta ser prácticamente nulo. Como el abatimiento a cierta distancia del pozo es el mismo en todas direcciones, el área de influencia del bombeo es un círculo (si el acuífero es relativamente homogéneo e isótropo) cuyo radio depende de las características T y S , y del tiempo de bombeo, entre otros factores, como se ilustra en las figuras 3.2.1 a 3.2.6.

Dado que la presión mínima se tiene en el pozo de bombeo, el agua fluye hacia él desde todas direcciones. Si el flujo es horizontal, conforme el agua se acerca al pozo, se mueve a través de superficies cilíndricas de área cada vez menor; como consecuencia, la velocidad del agua va incrementando conforme ésta se acerca al pozo. Puesto que la velocidad es proporcional al gradiente hidráulico, de acuerdo con la ley de Darcy, la pendiente de la superficie piezométrica incrementa gradualmente hacia el pozo, lo que da a dicha superficie una forma aproximadamente cónica. Por ello, a la depresión piezométrica provocada por el bombeo, se le acostumbra llamar "cono de depresión".

La forma y dimensiones del cono de depresión depende principalmente del caudal y tiempo de bombeo, y de las características S y T . Las figuras ilustran la influencia de estos factores en la forma de la depresión piezométrica.

El agua bombeada por el pozo es tomada del almacenamiento del acuífero. Si no hay recarga vertical en el área afectada por el bombeo, la depresión piezométrica se va expandiendo afectando un área cada vez mayor. Al crecer el área afectada, los abatimientos necesarios para mantener la extracción del pozo son cada vez menores, alcanzándose un momento en el que la superficie piezométrica se estabiliza en las proximidades del pozo. En estas condiciones se dice que el flujo está establecido.

3.3

Flujo Radial a un Pozo en Régimen Establecido (Ref. 1)

Sea un pozo que bombea a caudal constante Q .

El abatimiento de la carga piezométrica h tiene la misma distribución en una sección vertical que incluye el eje del pozo o sea hay simetría radial.

$$Q = -K \frac{h}{T} 2\pi rb$$

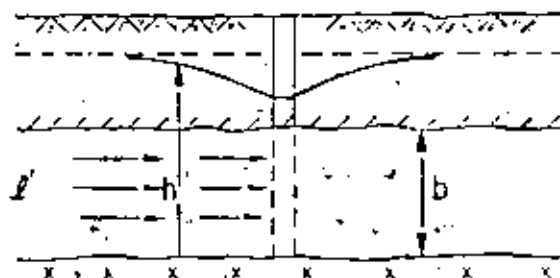
$$Q = K \frac{dh}{dr} 2\pi rb \quad (3.3.1)$$

Q Caudal de bombeo.

K Permeabilidad.

h Altura piezométrica a la distancia r del pozo de bombeo.

b Espesor del acuífero.



La ecuación (3.3.1), representa la condición de frontera al resolver la ecuación de Laplace para acuífero confinado:

$$\frac{d^2 h}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dh}{dr} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dh}{dr} \right) = 0$$

La integración conduce a:

$$r \frac{dh}{dr} = \frac{Q}{2\pi kb} \text{ (constante).}$$

Cuando se dispone de 2 pozos de observación con alturas piezométricas h_1 y h_2 y distancias al pozo de bombeo r_1 y r_2 :

$$\int_{h_2}^{h_1} dh = \frac{Q}{2\pi kb} \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r}$$

$$h_1 - h_2 = \frac{Q}{2\pi kb} \ln \frac{r_1}{r_2} \text{ donde } \ln \text{ es el símbolo de logaritmo natural.}$$

La fórmula correspondiente a un acuífero libre, es:

$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi K} L \frac{r_2}{r_1} \text{ --- (3.3.2)}$$

$$Q = \text{Cte.}$$

La derivación de las fórmulas anteriores, se basa en las hipótesis simplificatorias siguientes:

- a).- El acuífero es homogéneo e isótropo en el área afectada por el bombeo.
- b).- El espesor saturado inicial del acuífero freático, es constante.
- c).- Para un acuífero confinado, el espesor es constante.
- d).- El pozo penetra totalmente el acuífero.
- e).- La superficie piezométrica (o freática) es horizontal antes de iniciarse el bombeo.
- f).- El abarimamiento y el radio de influencia no varían en el tiempo.
- g).- El flujo es laminar.

Estas hipótesis parecen limitar seriamente la aplicabilidad de ambas fórmulas; pero, en realidad no es así: la permeabilidad media del acuífero es más o menos constante; aunque la superficie piezométrica no es completamente horizontal en ningún caso, el gradiente hidráulico es muy pequeño generalmente y no afecta sensiblemente la forma de la superficie piezométrica; el flujo es laminar en la mayor parte del área afectada por el bombeo, y sólo en la vecindad inmediata del pozo de bombeo puede llegar a ser turbulento; aunque el flujo no es rigurosamente establecido, después de cierto tiempo de bombeo puede considerarse como tal en un área próxima al pozo de bombeo.

Cuando se tienen 2 pozos de observación, las fórmulas (3.3.1) y (3.3.2) permiten calcular la permeabilidad en la forma:

$$K = \frac{Q}{2\pi b(h_1 - h_2)} L \frac{r_1}{r_2},$$

para el acuífero confinado, y

$$K = \frac{Q}{(h_2^2 - h_1^2)} \cdot L \frac{r_2}{r_1}, \text{ Para el acuífero libre.}$$

Aún cuando las fórmulas anteriores son aplicables a algunos casos prácticos, tienen dos limitaciones principales: no proporcionan información alguna respecto al coeficiente de almacenamiento del acuífero, y no permiten calcular la variación de los abatimientos en el tiempo. Además, no son aplicables al estudio de acuíferos semiconfinados, ni a sistema de penetración parcial, ni a muchos otros que se presentan con frecuencia en la práctica. Por otra parte, su aplicación requiere de 2 pozos de observación próximos al de bombeo, lo que no siempre es económicamente posible, especialmente cuando el acuífero se encuentra profundo o es de gran espesor.

Pruebas de Bombeo en Régimen Transitorio

En 1935, Theis inició el estudio de la hidráulica de pozos en régimen transitorio, al desarrollar la fórmula que lleva su nombre. Mediante la aplicación de la fórmula de Theis puede predecirse el abatimiento en un punto dado para cualquier tiempo de bombeo; la transmisividad y permeabilidad media pueden determinarse conociendo la variación de los niveles piezométricos al principio de la prueba, sin necesidad de esperar la estabilización de los niveles en los pozos de observación. Además, la aplicación de la fórmula requiere únicamente de observaciones en un pozo.

Theis desarrolló su fórmula, con base en las hipótesis siguientes:

- a).- El acuífero es homogéneo e isótropo.
- b).- El espesor saturado del acuífero es constante.
- c).- El acuífero tiene extensión lateral infinita.
- d).- El bombeo del pozo es a costa del almacenamiento del acuífero.
- e).- El pozo penetra totalmente el acuífero.
- f).- El agua del acuífero es liberada instantáneamente con el abatimiento.

En su forma más simple, la fórmula de Theis es:

$$a = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) \quad \text{---} \quad (3.3.3)$$

$$\begin{aligned}
 a &= \text{abatimiento a la distancia } r \text{ del pozo de bombeo} \\
 Q &= \text{caudal de bombeo} \\
 T &= \text{Transmisividad del acuífero} \\
 W(u) &= \text{función de pozo} = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \\
 u &= \frac{r^2 S}{4 t T} \quad \text{---} \quad (3.3.4) \\
 r &= \text{distancia al pozo de bombeo} \\
 t &= \text{tiempo de bombeo} \\
 S &= \text{Coeficiente de almacenamiento}
 \end{aligned}$$

Con base en (3.3.3) y (3.3.4), Theis desarrolló un método gráfico de solución para determinar los parámetros T y S , siguiendo la secuela siguiente:

- a).- Trazar la curva tipo $W(u) = 1/u$ en papel con trazado doble logarítmico.
- b).- Construir la gráfica $a-t$ (cuando se tiene un sólo pozo de observación).

- c).- Superponer las gráficas, manteniendo los ejes paralelos, y buscar la coincidencia de la curva de campo y la curva tipo.
- d).- Seleccionar un punto de ajuste y obtener sus coordenadas.
- e).- Substituir los valores de las coordenadas en las ecuaciones (3.3.3) y (3.3.4) y despejar los valores de T y S.

En la figura (2.3.7), se muestra la curva tipo y las observaciones realizadas en una prueba de bombeo; la fig. (3.2.8), ilustra su interpretación.

En general, debe darse menor peso a los puntos correspondientes a los tiempos más cortos, pues en esta parte de la prueba pueden tenerse las mayores discrepancias entre las condiciones reales y las hipótesis establecidas para obtener la fórmula: hay cierto retraso entre el abatimiento de la superficie piezométrica y la liberación del agua, retraso que puede ser mayor en esta parte de la prueba, en la que los niveles se abaten rápidamente; el caudal puede variar apreciablemente por el incremento brusco de la carga de bombeo, etc. Para tiempos mayores de bombeo, estas discrepancias se van minimizando y se tiene un mejor ajuste entre la teoría y las condiciones reales.

Un método más sencillo para la interpretación de las pruebas, fue desarrollado por Jacob, quien observó que para tiempos largos ($t > 5S r^2/T$), (3.3.3) puede

Expresarse:

$$a = \frac{2.30Q}{4Tt} \log \frac{2.25 Tt}{r^2 S} \quad (3.3.5)$$

A partir de esta fórmula, desarrolló el método gráfico de interpretación que lleva su nombre, y que consiste en lo siguiente:

- a).- Construir la gráfica abatimiento (en escala aritmética) contra tiempo (en escala logarítmica), Fig. 3.z.g
- b).- Pasar una recta por los puntos que se alinean, y determinar su pendiente. Los puntos correspondientes a los primeros minutos de la prueba se apartan generalmente de la recta, debido a que corresponden a tiempos cortos ($t < 5S r^2/T$) para los cuales no es válida la fórmula de Jacob.

- c).- Si la pendiente de la recta de ajuste es m , la transmisividad puede obtenerse de la expresión:

$$T = \frac{0.183 Q}{m}$$

- d).- Determinar el valor de t , r_0 , para el cual la prolongación de la recta de ajuste intercepta la línea de abatimiento nulo.
- e).- Calcular el coeficiente de almacenamiento mediante la expresión:

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

El mismo método puede seguirse cuando se conocen los abatimientos en varios pozos de observación para un tiempo dado. En este caso se grafica el abatimiento contra la distancia (en escala logarítmica). Los coeficientes buscados se obtienen mediante las fórmulas:

$$T = \frac{0.366 Q}{m} \quad S = \frac{2.25 T t}{r_0^2}$$

en que r_0 es el valor de r para el cual la prolongación de la recta de ajuste intercepta la línea de abatimiento nulo.

La forma más general del método se aplica cuando se tienen observaciones en varios pozos de observación para diferentes tiempos. En este caso, se llevan en el eje logarítmico los valores de la relación $\left\{ \frac{t}{r^2} \right\}$, y se sigue la secuela descrita anteriormente.

La fig. (3.210), compara la curva tipo de Theis con la aproximación de Jacob, en trazado semilogarítmico.

Otros Sistemas de Flujo.

No obstante que la fórmula (3.3.3), se aplica en muchos casos, existen numerosos sistemas de flujo que difieren notablemente del resuelto por Theis. Cuando no puede lograrse un ajuste razonable entre la curva de datos de campo y la curva tipo, significa que alguna o algunas de las hipótesis básicas de la teoría no se están cumpliendo y el método descrito no es aplicable.

Con posterioridad a Theis, diversos autores obtuvieron ecuaciones para numerosos sistemas de flujo; penetración parcial, semiconfinamiento, acuíferos freáticos, acuíferos de extensión limitada, acuíferos con anisotropía, etc.

ACUÍFERO SEMICONFINADO

$$T \nabla^2 h = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$Q_l = k' b' \frac{H-h}{b'}$$

$$T \nabla^2 h + K' \frac{H-h}{b'} = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

$a = H - h$
con el cambio de variable

$$-T \nabla^2 a + K' \frac{a}{b'} = -S \frac{\partial a}{\partial t}$$

si $B = \sqrt{\frac{Tb'}{K'}}$

$$\nabla^2 a - \frac{a}{B^2} = -\frac{S}{T} \frac{\partial a}{\partial t}$$

Condiciones de frontera

$$a \rightarrow 0 \quad \text{si } r \rightarrow \infty$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial a}{\partial r} = -\frac{Q}{4\pi T}$$

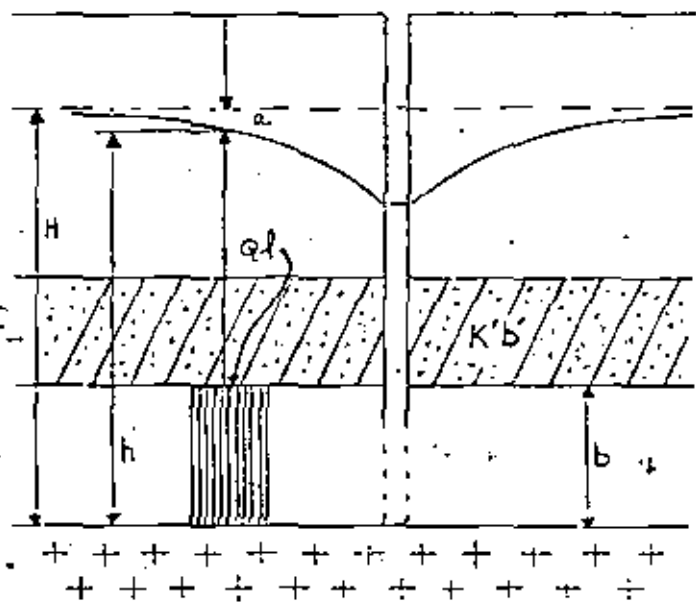
Condición inicial $a(+0) = 0, \quad t=0.$

$$\text{Solución } a = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^\infty \frac{1}{u} e^{-y} e^{-\frac{r^2}{4B^2}y} dy$$

$$a = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \frac{r}{B}), \quad \text{donde la función de pozo } W(u, \frac{r}{B}) \text{ para}$$

acuífero semiconfinado tiene el valor de la integral de la ecuación anterior.

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

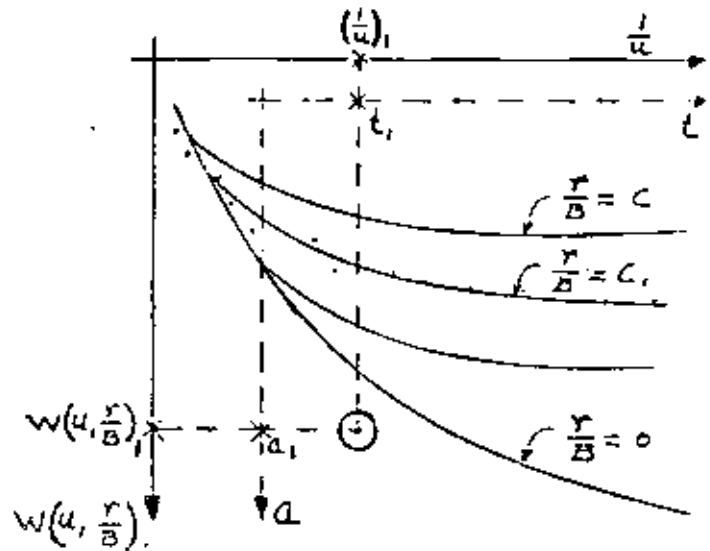


Como en el caso de acuífero confinado, se utiliza el método de curva tipo para determinar los parámetros de los acuíferos.

$$T = \frac{Q}{4\pi a_s} \left[W(u, \frac{r}{B}) \right]$$

$$S = \frac{4Tt_r u_r}{r^2}$$

$$K' = \frac{Tb' C^2}{r^2}$$



ACUIFERO LIBRE

Ecuación fundamental de conservación de la masa:

$$\frac{1}{2} \nabla^2 h^2 = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Condiciones de frontera

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0$$

$$h(r, z, 0) = H$$

$$h(\infty, z, t) = H$$

$$H^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi k} W(u)$$

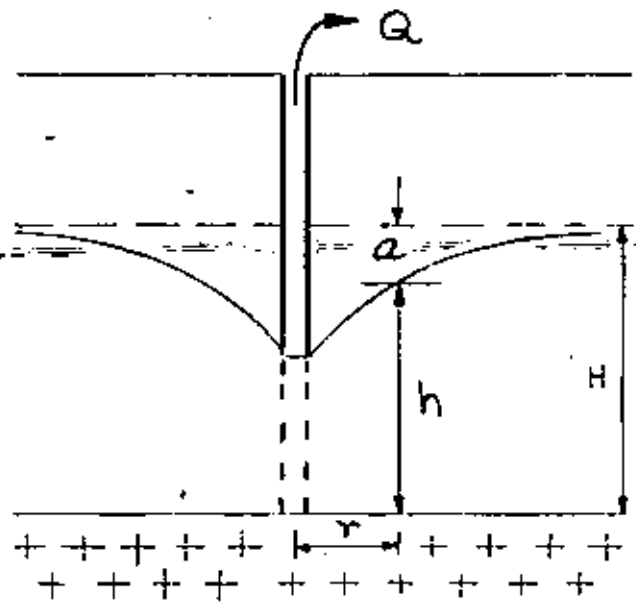
$$h = H - a$$

$$H^2 - (H - a)^2 = a(2H - a)$$

$$= (1 - \frac{a}{2H}) 2aH.$$

Si $\frac{a}{H} < 0.02$

$$a = \frac{Q}{4\pi kH} W(u)$$



Habiendo utilizado las hipótesis de Dupuit la componente vertical del flujo se desprecia si $r > 1.5 H$. se presenta además retraso en el drenado.

$$\text{Si } \frac{a}{H} > 0.02$$

$$a - \frac{a^2}{2H} = \frac{Q}{4\pi KH} W(u)$$

con la corrección de Jacob.

Penetración Parcial.-

La penetración parcial de los pozos en el acuífero produce deformación de la red de flujo, que se traduce en la disminución de la eficiencia de bombeo. Las figuras 3.2.11 y 3.2.12 muestran las redes de flujo de los casos de 25% y 50% de penetración para el caudal, el tiempo y las características hidráulicas T y S constantes que se indican.

Las gráficas 3.2.13 y 3.2.14, que relaciona el caudal Q con el abatimiento a_w y con el cosciento longitud de penetración, l , a espesor de acuífero b , permiten apreciar cómo para un mismo caudal se incrementa el abatimiento a medida que la relación l/b disminuye. De aquí la conveniencia de hacer un análisis económico, en el que se compare el costo de inversión inicial por mayor profundidad del pozo contra el costo de operación por consumo de energía para compensar el incremento de abatimiento.

Hantush (Ref 4), plantea las ecuaciones de penetración parcial: general, de acuíferos semiconfinados y confinados para tiempos largos y cortos, en pozos de observación y en la pared del pozo de bombeo y de los abatimientos medios y en piezómetros.

Comentarios acerca de la interpretación de Pruebas de Bombeo.-

La interpretación de las pruebas tiene el gran problema de que sistemas de flujo muy diferentes pueden provocar respuestas muy semejantes de los niveles piezométricos

del acuífero. Entonces el que una curva formada con datos de campo se ajuste a una curva tipo, no significa necesariamente que se trate del sistema de flujo representado por esta última, siendo necesario contar con información complementaria para definir el sistema de que se trata: cortes geológicos y registros eléctricos; características constructivas del pozo de bombeo y del (o los) de observación; ubicación de afloramientos, ríos, canales o pozos en operación, que se encuentren próximos al pozo de prueba y que pudieran influir en el comportamiento del acuífero durante la prueba.

Otro de los problemas que presenta la interpretación de las pruebas de bombeo, está relacionado con la duración de las mismas. Hay diferentes sistemas de flujo que provocan el mismo comportamiento de los niveles piezométricos en la primera parte de la prueba, y sólo se puede diferenciar uno de otro después de cierto tiempo de bombeo. Si la prueba es relativamente corta, su interpretación puede ser muy dudosa, pues es muy difícil definir de que sistema de flujo se trata. Es recomendable, entonces, que la prueba de bombeo sea de la mayor duración posible (uno o más años).

Por otro parte, la selección de pozos de observación requiere de cierto cuidado. Cuando tanto el pozo de bombeo como los pozos de observación son construidos con el fin específico de realizar las pruebas, puede tenerse cierta seguridad de que uno y otros están captando un mismo acuífero. Sin embargo, cuando se utilizan pozos ya existentes, puede ocurrir que las profundidades del pozo de bombeo y del (o los) de observación sean completamente diferentes. Si el acuífero es más o menos homogéneo e isotrópico, si todos los pozos utilizados en la prueba están captándolo, y si el flujo es sensiblemente horizontal, la diferencia de profundidades entre los pozos no afecta a la prueba. En cambio, si el acuífero es anisótropo, si son varios acuíferos separados total o parcialmente por lentes de menor permeabilidad, o si el flujo no es predominantemente horizontal, la diferencia de profundidades dificulta considerablemente la interpretación de la prueba o la hace no interpretable.

Con frecuencia, la imposibilidad de contar con pozos de observación, obliga a observar los efectos de bombeo únicamente en el pozo bombeado. La interpretación de estas pruebas es aún muy dudosa, sus resultados deben tomarse con muchas reservas, pues en el pozo de bombeo se presentan efectos adicionales no tomados en cuenta en la mayoría de las teorías; pérdidas por entrada, fricción y cambios de dirección; flujo turbulento en las proximidades del pozo; efecto del engravado, concentraciones de flujo, etc.

Una vez obtenidas las características T y S por el método aplicable en cada caso, es posible predecir el abatimiento que se provocaría en cualquier punto dentro del área de influencia del bombeo para diferentes tiempos y diferentes caudales de extracción. También, puede predecirse los efectos inducidos por el bombeo simultáneo de varios pozos, mediante la superposición de los efectos inducidos por cada uno de ellos. Esto permite analizar problemas de interferencia entre pozos; definir el espaciamiento más apropiado entre pozos; diseñar un sistema de drenaje vertical, etc.

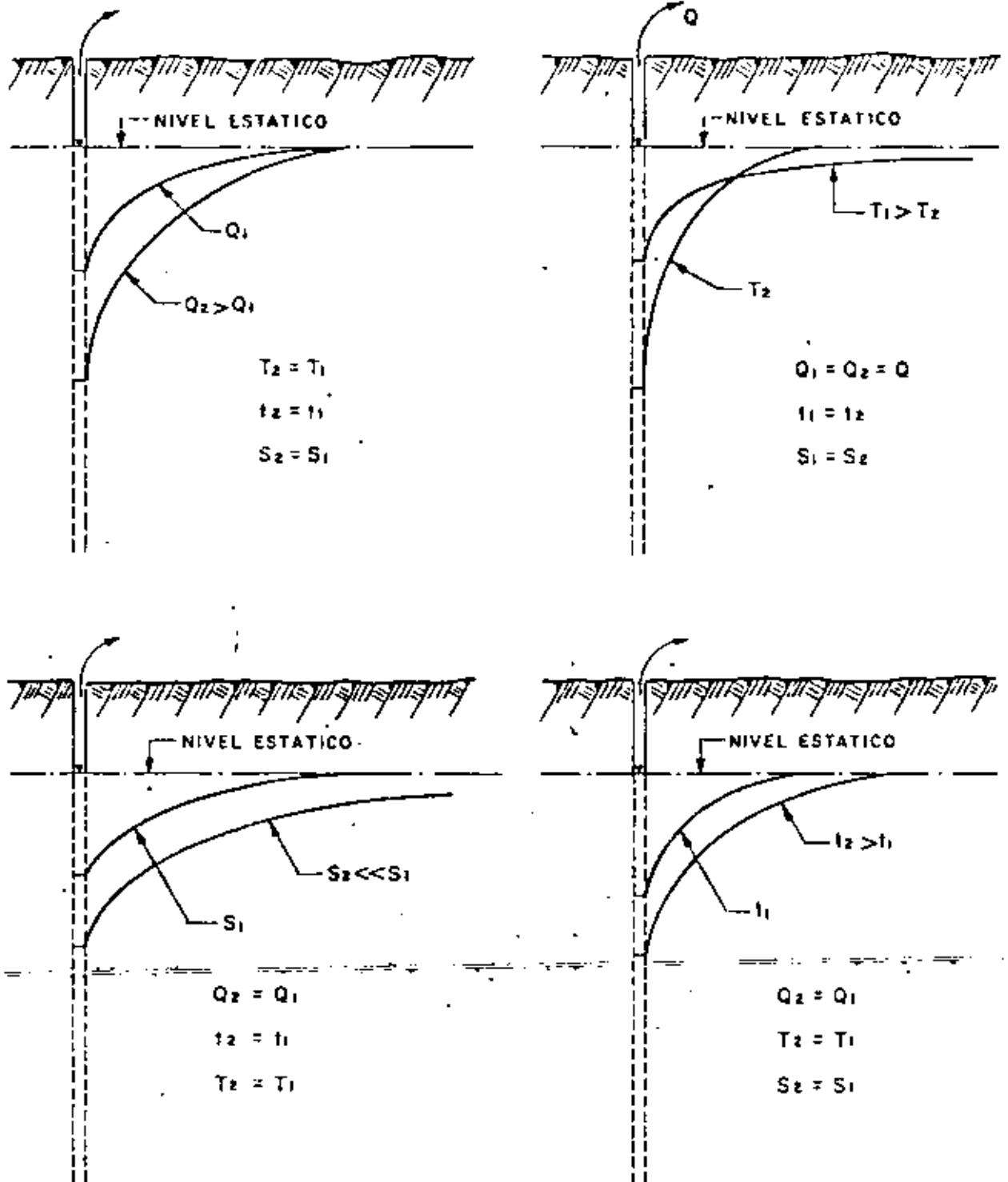
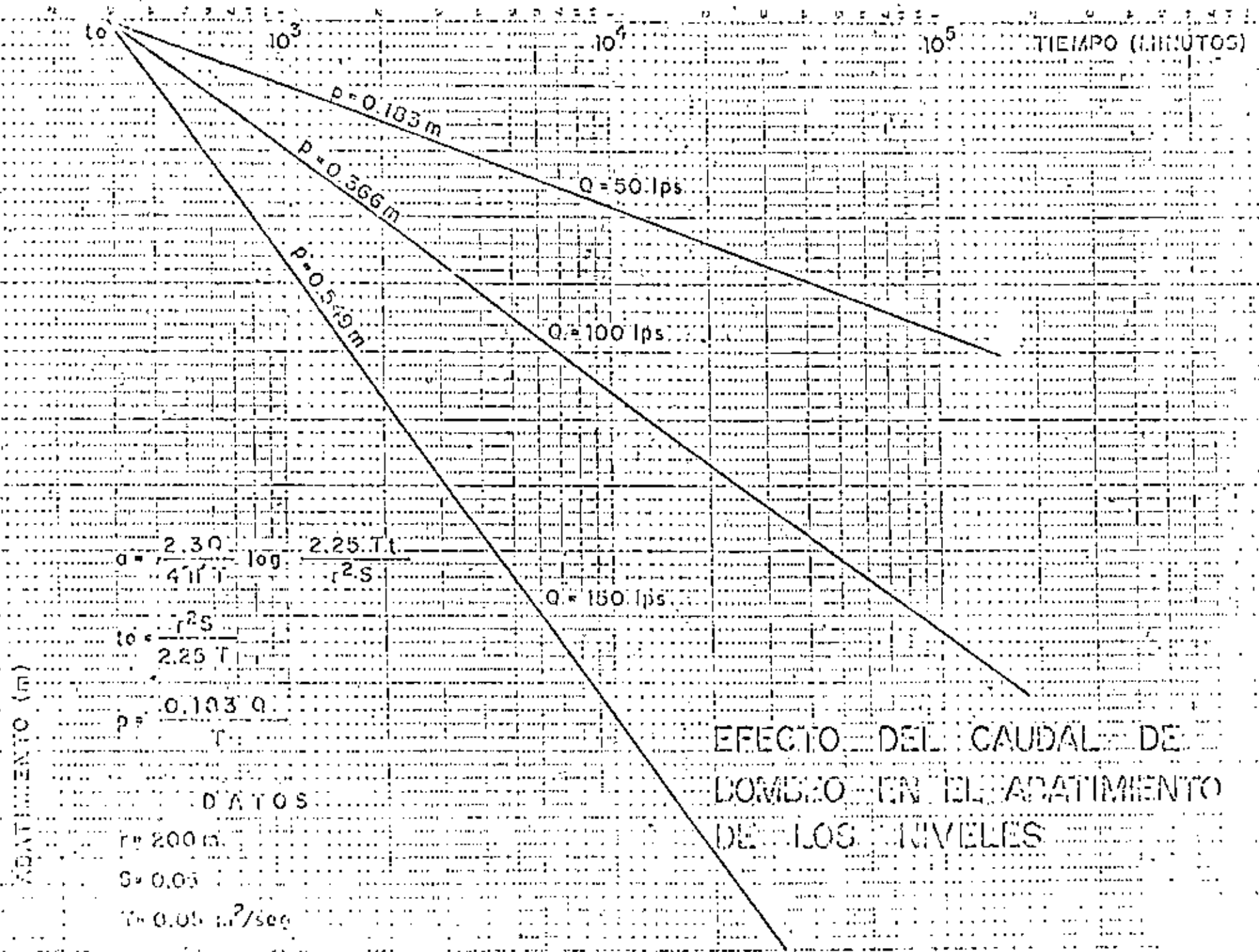
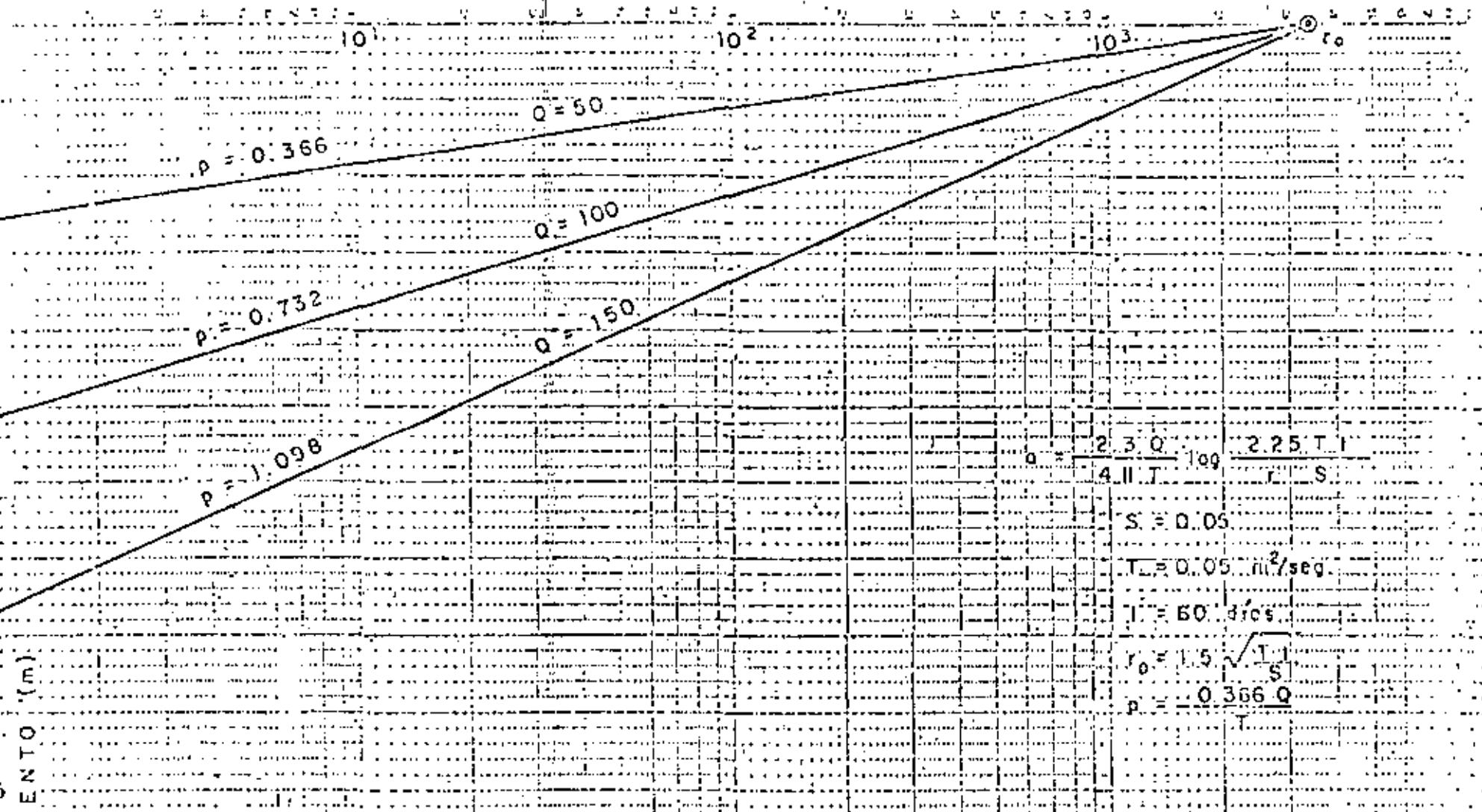


FIG. 3.2.1. — INFLUENCIA DEL CAUDAL (Q), TIEMPO DE BOMBEO (t), TRANSMISIVIDAD (T), Y ALMACENAMIENTO (S), EN LA FORMA Y DIMENSIONES DEL CONO DE DEPRESION



Distancia al Pozo de Bombeo (m)



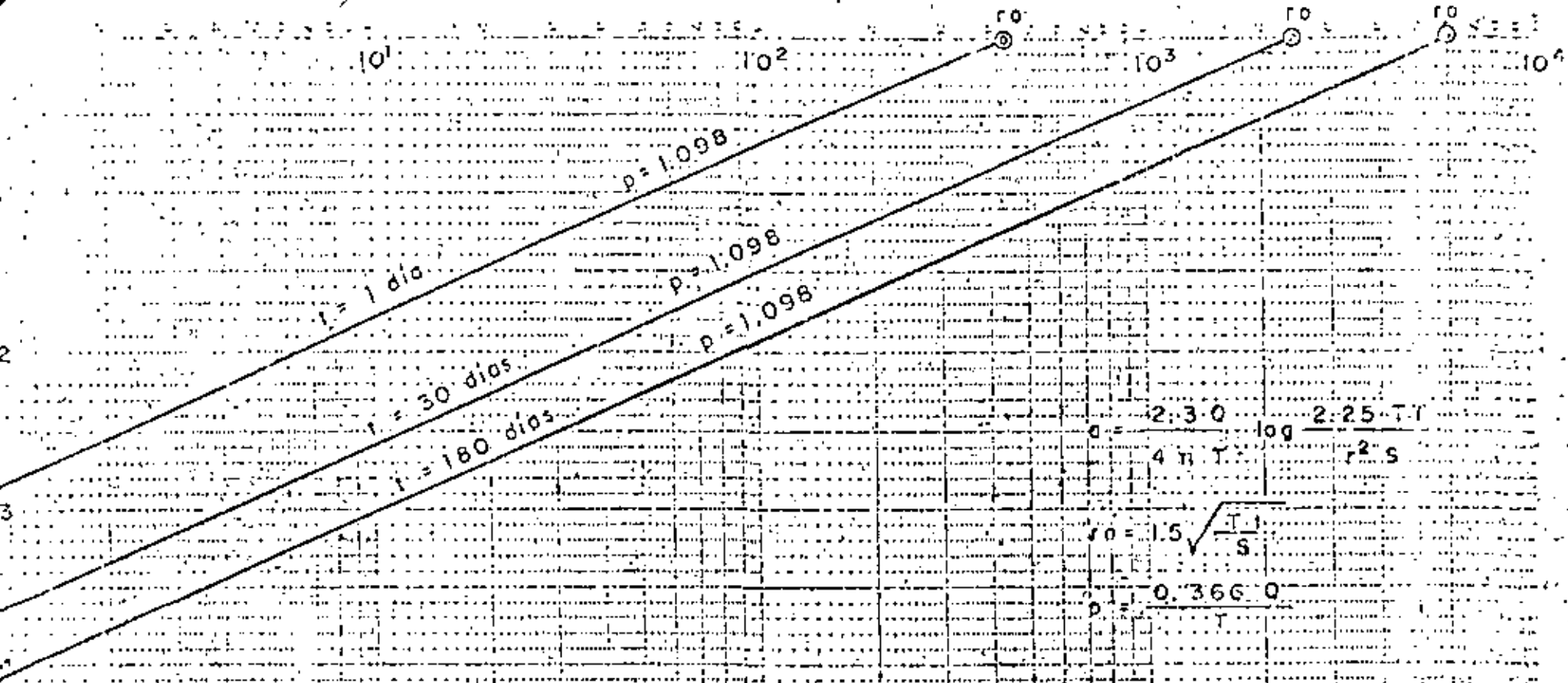
$$s = \frac{2.3 Q}{4 \pi T} \log \frac{2.25 T t}{r^2 S}$$

$S = 0.05$
 $T = 0.05 \text{ m}^2/\text{seg}$
 $t = 60 \text{ seg}$
 $r_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T t}{S}}$
 $p = 0.366 Q$

INFLUENCIA DEL CAUDAL DE BOMBEO EN EL ABATIMIENTO DE LOS NIVELES DEL AGUA

ASATAMIENTO (m)

Fig. 3.23



$$d = \frac{2.30}{4 \pi T} \log \frac{2.25 T r_0^2 S}{r^2 S}$$

$$r_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T}{S}}$$

$$p = \frac{0.366 Q}{T}$$

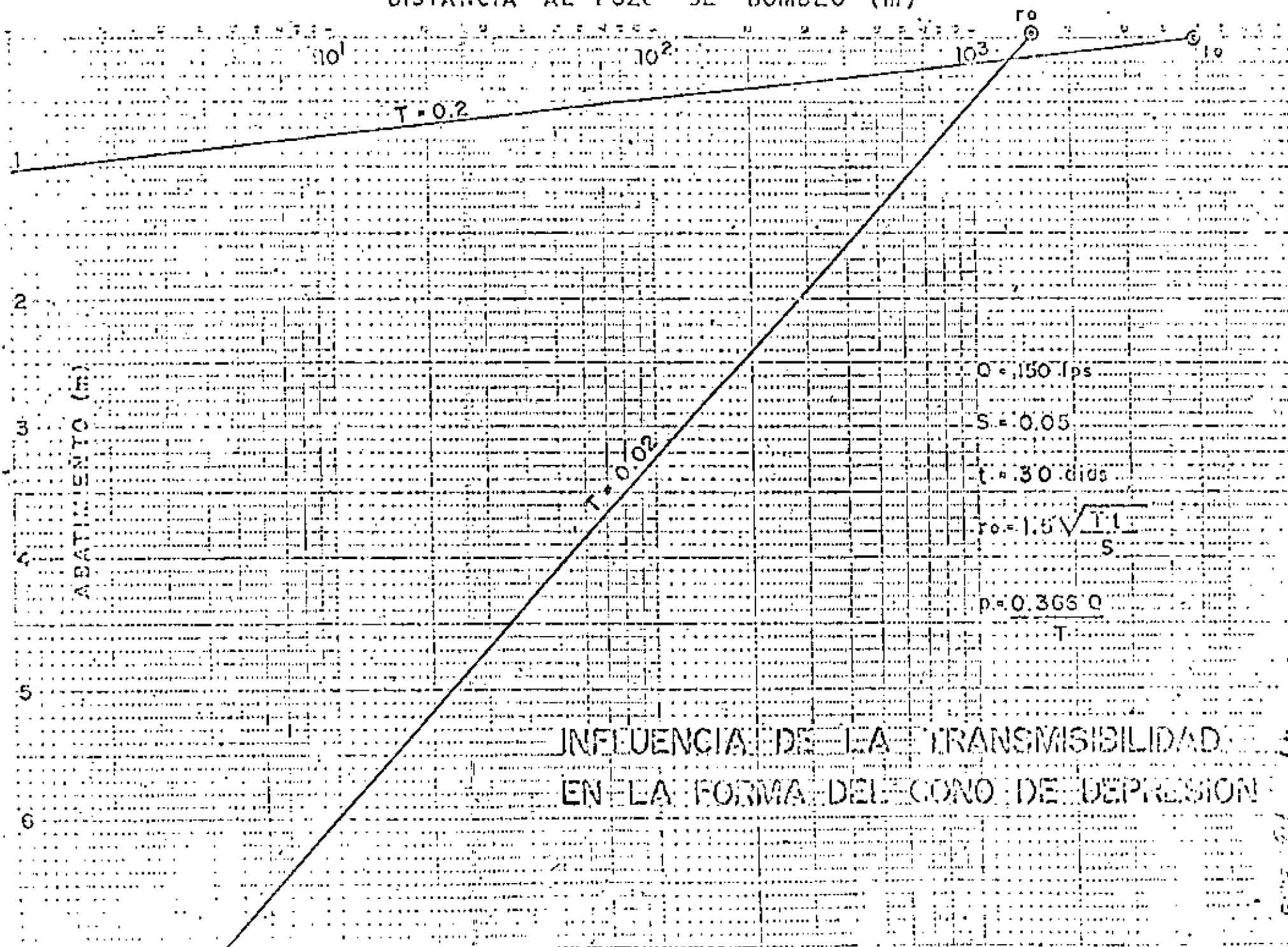
INFLUENCIA DEL TIEMPO DE BOMBEO
 EN LA EXTENSION DEL CONO DE
 DEPRESION

DATOS

Q	1.50 lps
S	0.05
T	0.05 m ² /seg

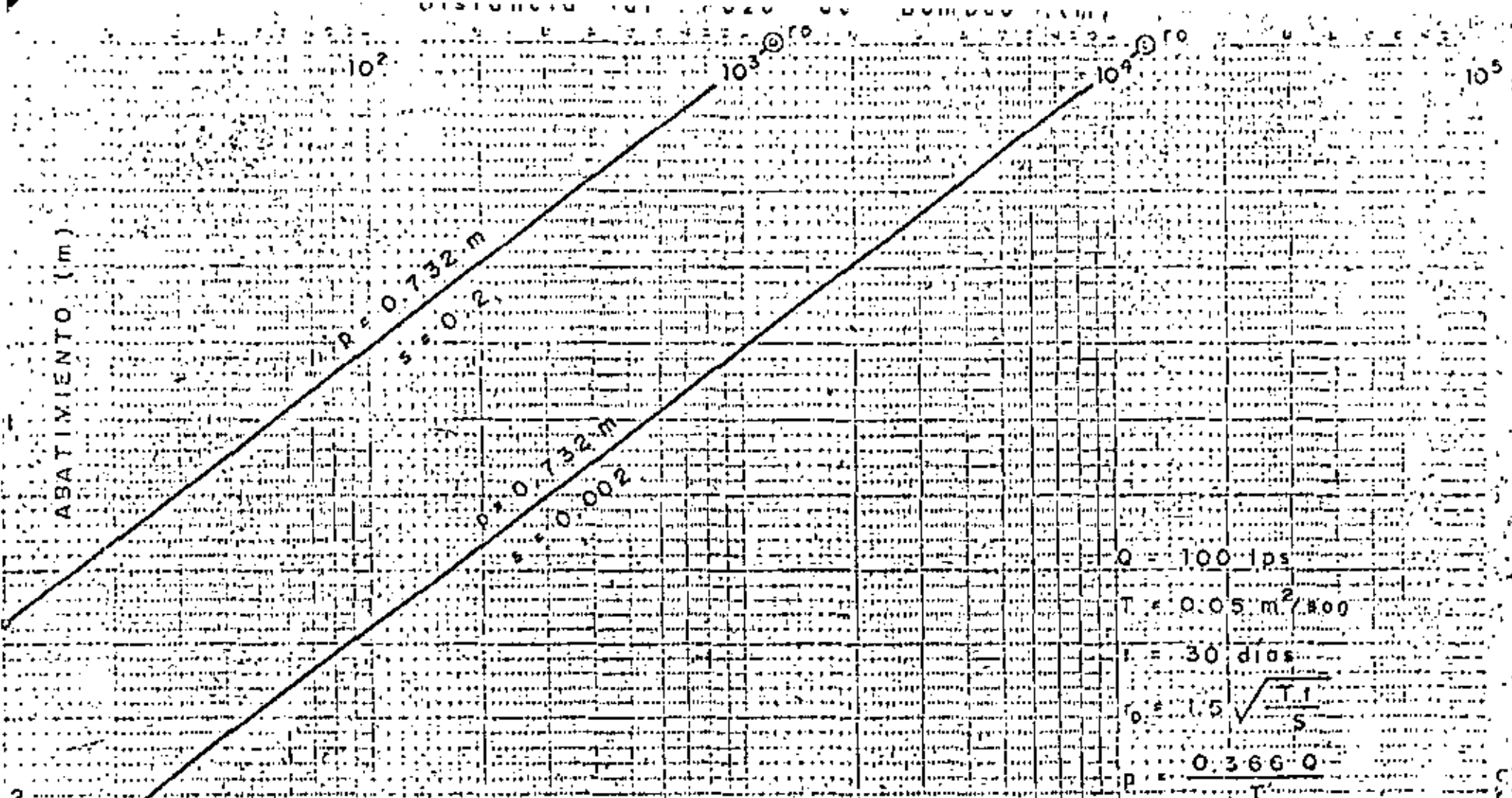
DISTANCIA AL POZO DE BOMBEO (m)

ABATIMIENTO (m)



INFLUENCIA DE LA TRANSMISIBILIDAD
EN LA FORMA DEL CONO DE DEPRESION

4)
1952-2005



INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO EN LA FORMA DEL CONO DE DEPRESION

42
FIG. 3.2.6
49

CURVA TIPO PARA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO EN POZOS TOTALMENTE PENETRANTES EN ACUIFEROS CONFINADOS

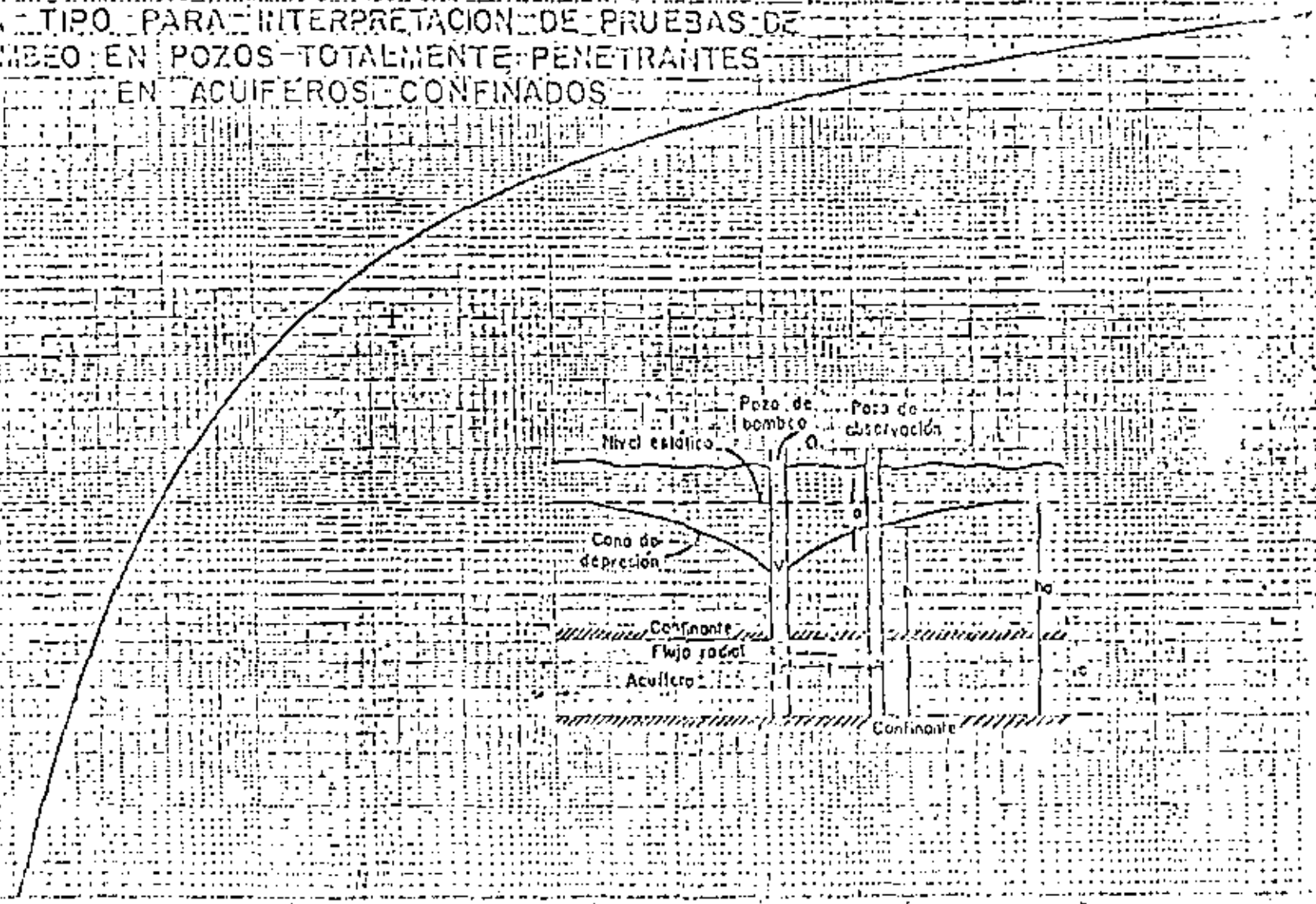
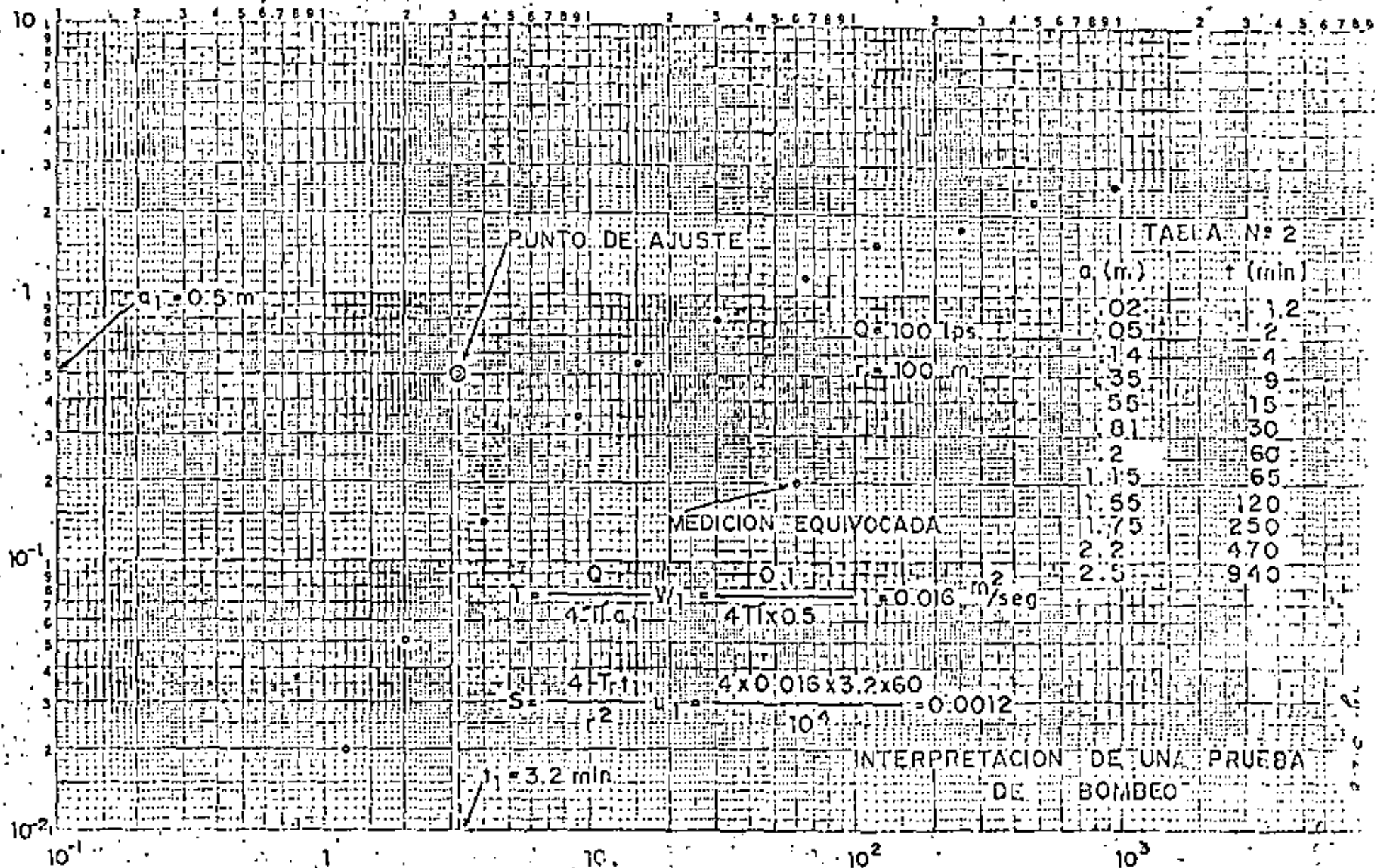


Fig. 3.2.7



$t_0 = 7.4 \text{ min.}$

LECTURA EQUIVOCADA

$p = 1.2 \text{ m/ciclo}$

INTERPRETACION DE PRUEBA DE BOMBEO POR EL METODO DE JACOB.

$$T = \frac{0.183 Q}{p} = 0.005 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = \frac{2.25 T r^2}{r^2} = 0.0015$$

$Q = 100 \text{ lps}$

$r = 100 \text{ m}$

2

10

10¹

10²

10³

45 FIG. 3.29

$\frac{c}{C/4 \pi T}$

1.78°

$$2.3 \log \frac{2.25 T D}{r^2 S}$$

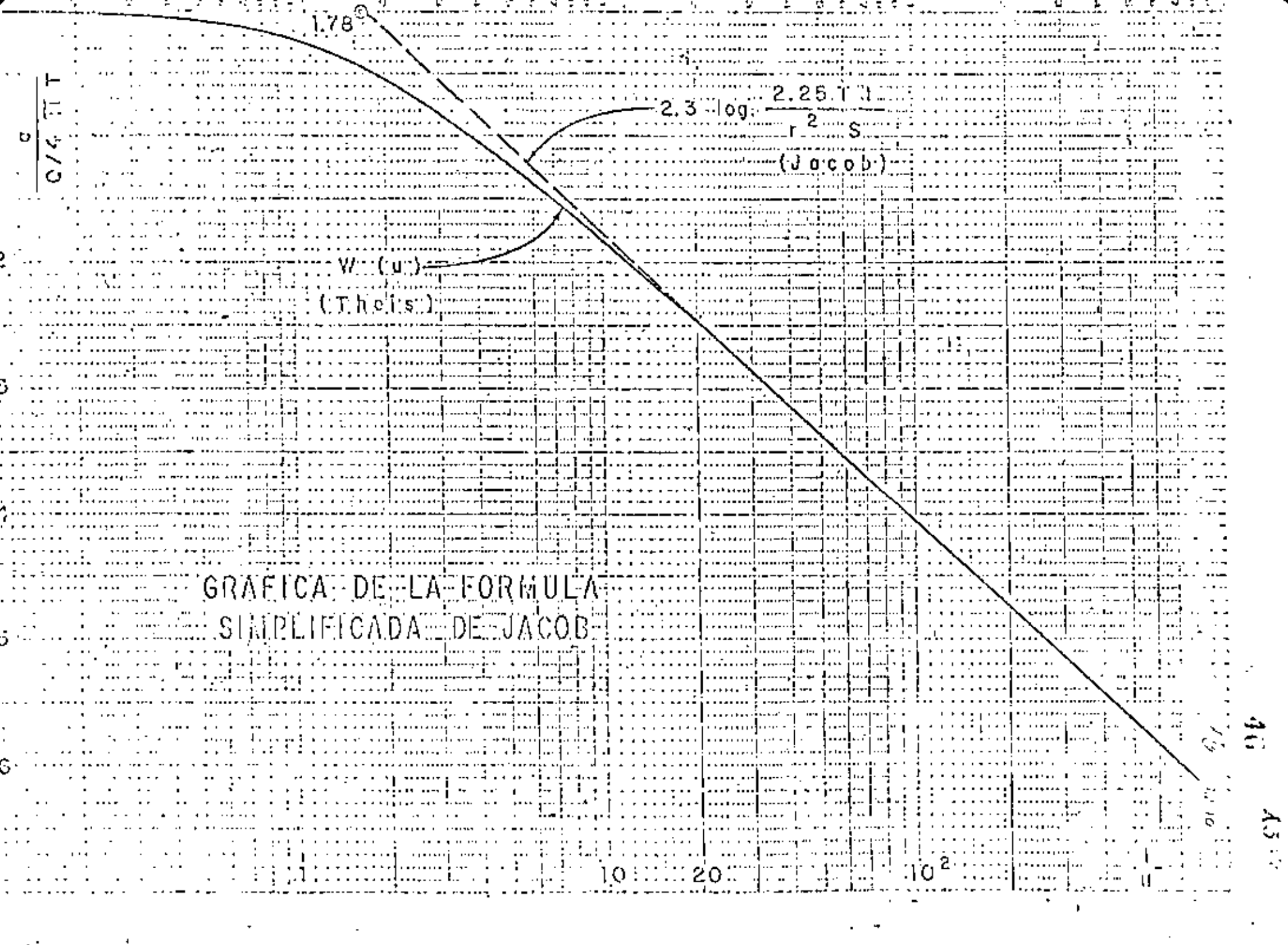
(Jacob)

$W(u)$
(Theis)

GRAFICA DE LA FORMULA
SIMPLIFICADA DE JACOB

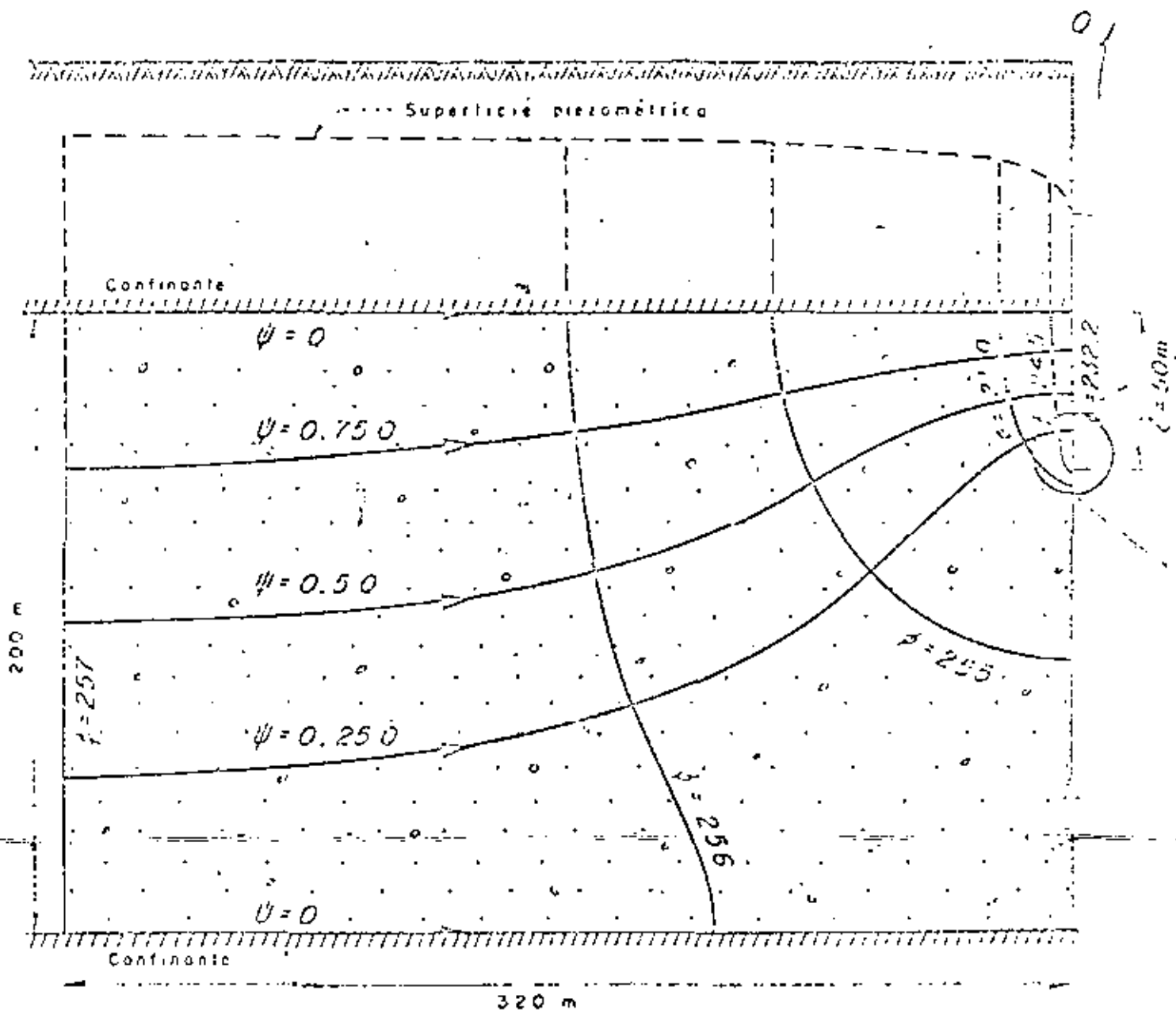
10 20 10²

46
45
19
2.10



FLUJO HACIA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE

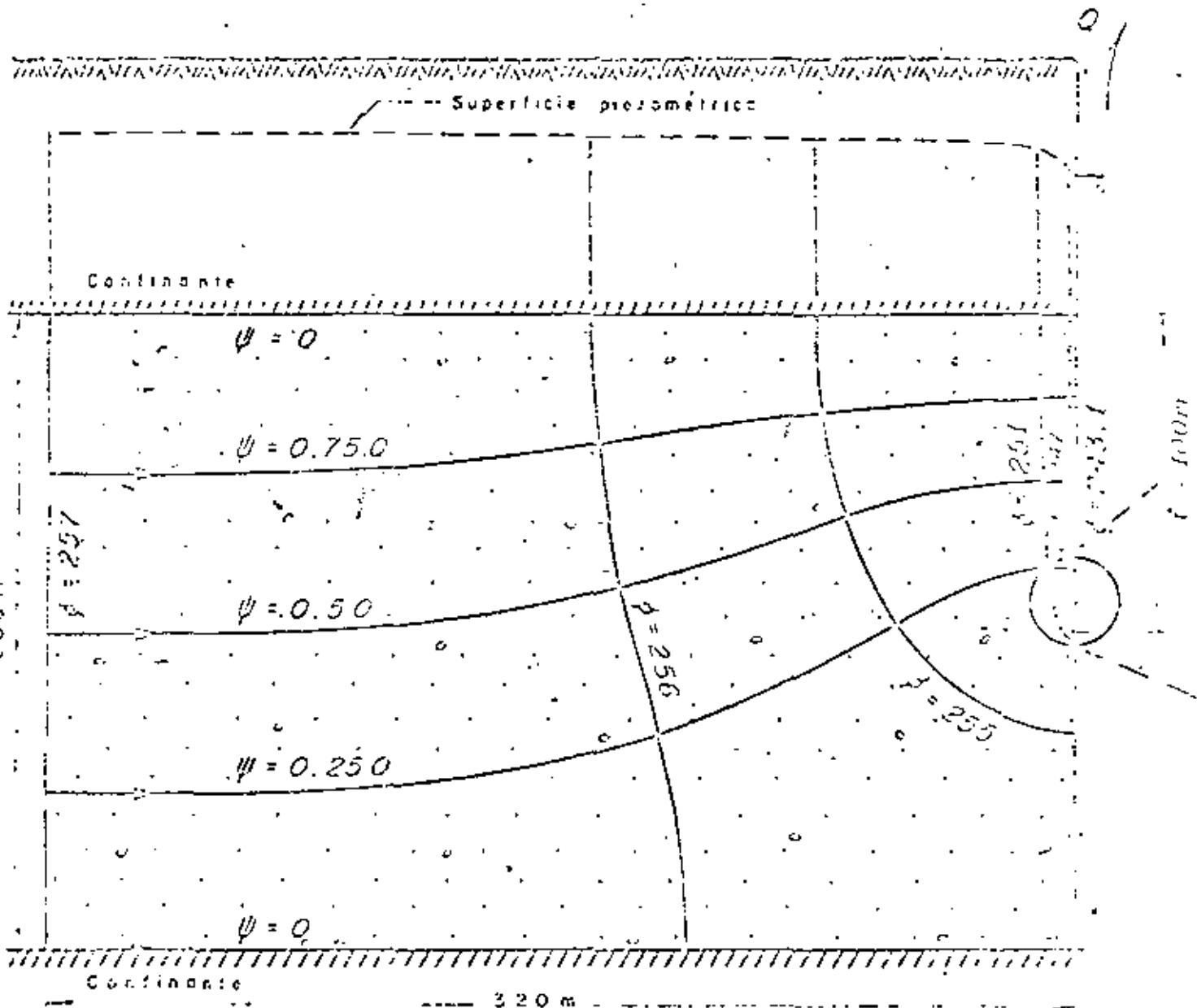
47



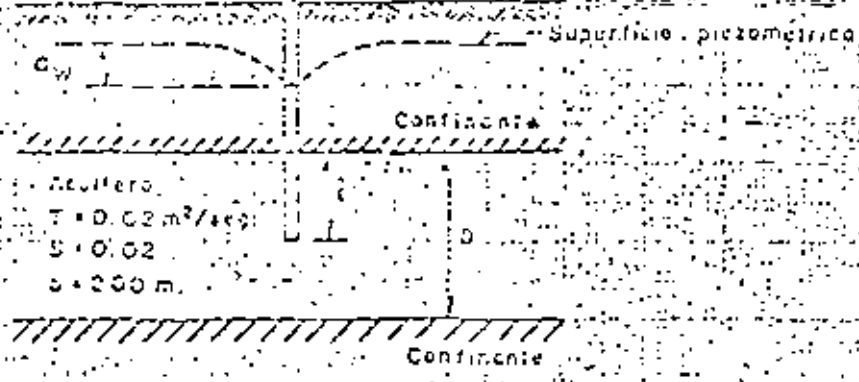
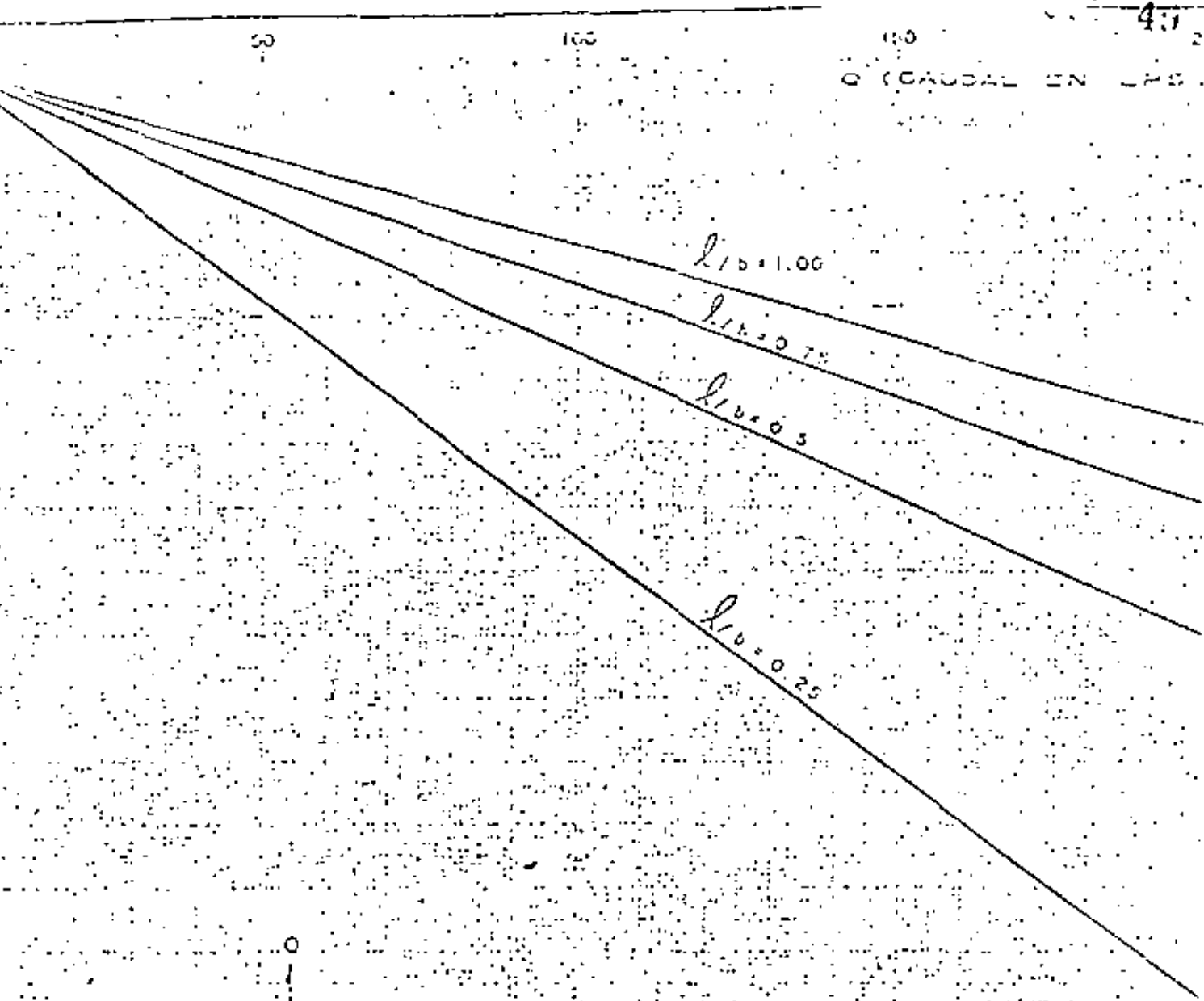
ESCALA 1 : 2000

NOTA : La red de flujo corresponde a un tiempo de bombeo de 2000 horas, con un caudal constante de 150 lps, en un acuífero de propiedades físicas: $T = 0.02 \text{ m}^2/\text{seg.}$ - $S = 0.02$

FLUJO HACIA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE



NOTA: La red de flujo corresponde a un tiempo de bombeo de 2000 horas, con un caudal constante de 150 lps, en un acuífero de propiedades físicas: $T = 0.02 \text{ m}^2/\text{seg}$, $S = 0.02$

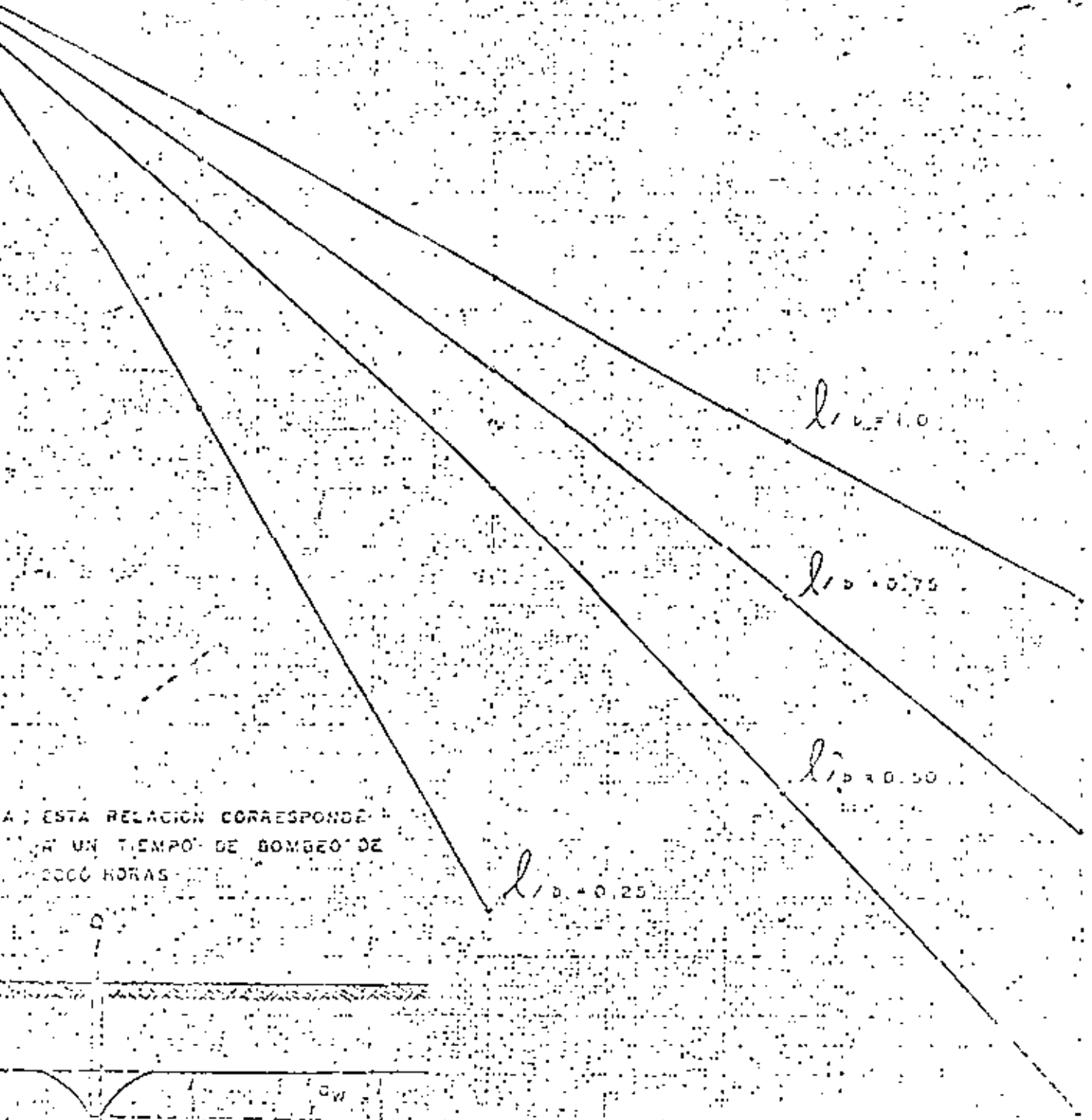


Acuífero
 $T = 0.02 \text{ m}^2/\text{seg}$
 $S = 0.02$
 $d = 200 \text{ m}$

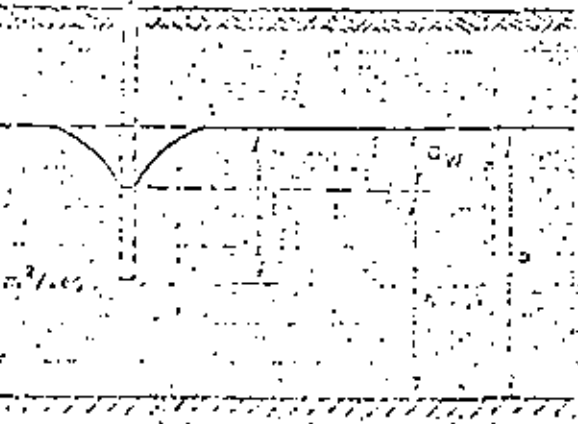
ESTA RELACION CORRESPONDE A UN
 TIEMPO DE BOMBEO DE 2000 HORAS

SECRETARIA DE RECURSOS HUMANOS
 COMISION NACIONAL DE REGULACION Y CONTROL DE LA
 DISTRIBUCION DE AGUAS SUBTERRANEAS
 POZOS PARCIALMENTE PENETRANTES
 ASOCIADA $Q - d_w - l/b$
 ANEXO 3

Q (CAUDAL EN LPS)



A ESTA RELACION CORRESPONDE
 UN TIEMPO DE BOMBEO DE
 2000 HORAS



SECRETARIA DE RECURSOS HUMANOS
 DEPARTAMENTO DE IRRIGACION Y CONTROL DE AGUA
 DIRECCION DE POZOS SUBTERRANEOS
 POZOS PARCIALMENTE PENETRANTES
 RELACION Q-HW
 ACUIFERO 113

4. INTRUSION SALINA

Cuando por efecto de sobreexplotación en un acuífero costero, se produce la inversión del flujo subterráneo, se provoca una condición de desequilibrio que propicia el avance de la interfase salina hacia tierra adentro, con la consecuente mezcla del agua dulce de los acuíferos con el agua salada del mar, una vez que los pozos de explotación empiezan a extraer el agua salada, se requiere abandonar las obras que constituyen la infraestructura derivada del aprovechamiento del agua.

A continuación se presenta el análisis para la condición estática, dado por Ghyben-Herzberg.

Para la figura 5.1 y nomenclatura indicada a continuación se tiene:

$$-Z_s \rho_s g = \rho_d g (-Z_s) + \rho_d g Z_d$$

$$Z_s = \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} Z_d, \text{ como, } \rho_s = 1.026 \frac{\text{gr. masa}}{\text{cm}^3}, \rho_d = 1.000 \frac{\text{gr. masa}}{\text{cm}^3}$$

$Z_s = 38 Z_d$, que señala la posición de la interfase, sin olvidar que ésta presenta una zona de difusión.

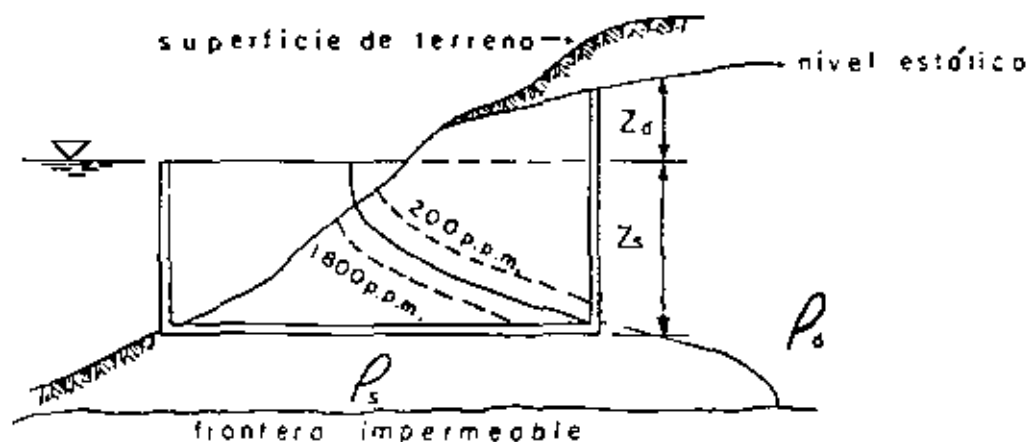


Fig. 5-1

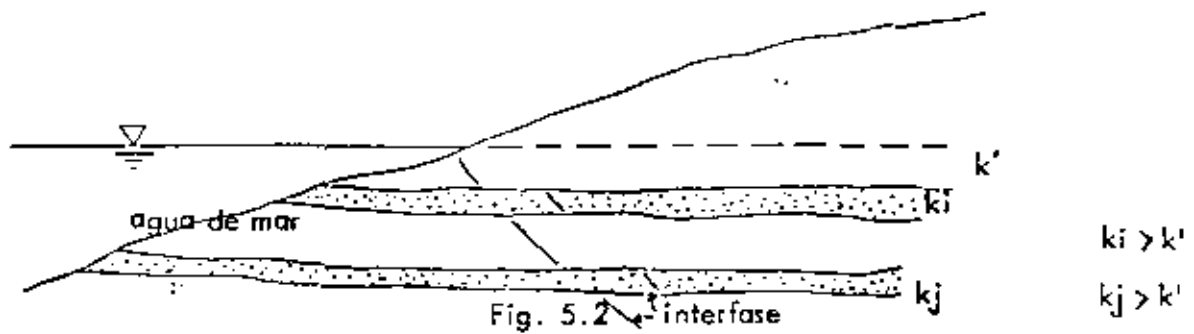
Z_d : elevación del nivel estático respecto al nivel del mar

Z_s : elevación (-) de la interfase salina

ρ_d : densidad del agua dulce

4 - 1

ρ_s : densidad del agua salada



En la figura 5.2 se tienen estratos de mayor permeabilidad.

El descenso de presión en los estratos más permeables trae como consecuencia el avance mayor de la intrusión salina en esos estratos.

Al causar una sobreexplotación al grado de que los niveles estáticos se encuentren por debajo del nivel del mar se presenta una situación de desequilibrio mediante el cual lentamente el agua de mar desplaza al agua dulce en todo el volumen correspondiente al área con niveles bajo el nivel del mar. Debido a que un pequeño volumen de agua de mar es suficiente para elevar fuertemente la concentración salina del agua dulce y que el fenómeno tiene un avance lento, puede considerarse irreversible.

Al analizar la velocidad de avance de la intrusión aplicando la Ley de Darcy es necesario recordar que esta ley nos da una velocidad aparente, siendo la real:

$$V_r = \frac{V_a}{S_y}$$

S_y = Rendimiento específico

V_r = Velocidad real

V_a = Velocidad aparente

5. MANEJO DE ACUIFEROS

5.1 LA EXPLOTACION DEL AGUA SUBTERRANEA EN MEXICO ESTRATEGIA PARA SU MANEJO ADECUADO

El agua subterránea en México constituye uno de los recursos hidráulicos más importantes, principalmente para sus regiones áridas y semiáridas, que cubren más del 60% del área del país, motivo por el cual su aprovechamiento en dichas zonas se ha llevado a cabo en forma intensiva, siendo en muchos casos la base del auge económico alcanzado en ellas.

La explotación intensiva del agua subterránea en México se inició a partir de 1950, año a partir del cual se crearon los más importantes Distritos de Riego del país en los que se obtiene el 50% de la producción agrícola; sin embargo, en ese entonces no se contaba con la tecnología adecuada para determinar el comportamiento de los acuíferos y a raíz de ello su aprovechamiento se efectuó sin control, siguiendo únicamente la política de satisfacer las necesidades que generaba el desarrollo de las zonas agrícolas.

Debido a la perforación desmesurada de pozos, que provocó la extracción de grandes volúmenes de agua subterránea, en México existen más de 30 acuíferos con sobreexplotación (lámina 1), lo que ha llevado a realizar el inventario de nuestros recursos hidráulicos subterráneos a través de estudios en los que se está aplicando la tecnología del agua subterránea moderna. Dichos estudios se iniciaron propiamente a partir del

año de 1968, contándose a la fecha con más de 150 estudios a detalle, cuyos resultados apoyan a estudios regionales que cubren aproximadamente un 70% del área del país, siendo posible ahora implantar políticas de explotación que lleven al aprovechamiento del agua subterránea en forma racional mediante un manejo 1/ adecuado de la misma.

En México, como en otras partes del mundo, se considera que el agua subterránea - está constituida por dos componentes principales, el volumen renovable (recarga estacional del acuífero) y el volumen no renovable (almacenamiento del acuífero); el manejo de ambas depende entre otras cosas de la determinación del potencial que tenga cada uno y, además de la existencia o falta de fuentes alternativas que permitan realizar el uso conjunto de los recursos hidráulicos existentes.

En la actualidad la tendencia en el manejo del acuífero se enfoca a determinar niveles máximos y mínimos del agua con el fin de regular la capacidad de su almacenamiento, coadyuvando con esto al desarrollo de actividades económicas que de otra manera no podrían realizarse. Dentro de este planteamiento siempre debe tenerse en mente los efectos que podrían generarse en el comportamiento de los acuíferos, a fin de evitar que se lleguen a producir colapsos económicos al no poder restituir las condiciones originales con las que se inició la explotación del agua subterránea.

1/ El manejo del agua subterránea tiene por objeto regular la explotación, el uso y aprovechamiento de este recurso, considerando su interdependencia con el agua superficial, a fin de satisfacer las distintas demandas de agua a corto, mediano y largo plazos.

El manejo del agua subterránea que hasta la fecha se ha hecho en México, responde, además de las diversas condiciones físicas del medio (clima, hidrología, geología, etc.), a las presiones socioeconómicas producidas por el mismo desarrollo, lo que ha motivado que en algunas zonas el volumen extraído de los acuíferos rebase su recarga natural generando con eso que se presenten abatimientos progresivos en los niveles piezométricos, lo que trae como efectos colaterales incremento en los costos de bombeo, intrusión de agua de mar en acuíferos costeros, asentamiento de terrenos, formación de grietas y migración de aguas salinas. Los casos más críticos de sobreexplotación detectados en el país y los principales efectos que han producido se consignan en el cuadro 1.

Con el fin de que los problemas generados por la sobreexplotación no progresen gravando cada vez más la economía de las zonas afectadas, ha sido necesario resolver graves problemas de manejo, mediante soluciones tales como reducción de las extracciones hasta un volumen del orden de la extracción permanente ^{2/}, y cuando esto no es posible, por lo menos reducir la magnitud de los efectos indeseables con el fin de alargar la vida útil de los acuíferos aplicando medidas correctivas como implantación de vedas rígidas que no permitan el incremento de las extracciones en los aprovechamientos existentes ni perforación de nuevos pozos, redistribución de las captaciones para reducir la velocidad de abatimiento, incremento de la recarga mediante infiltración artificial, importación de agua desde cuencas vecinas y realocalización de captaciones o

^{2/} Término equivalente a rendimiento seguro o recarga aprovechable que se define como el máximo volumen de extracción que no produce abatimiento indefinido ni daños irreparables al acuífero.

CUADRO 1. ZONAS CON PROBLEMAS DE EXPLORACIÓN EXCESIVA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA REPÚBLICA MEXICANA.

ZONA	ESTADO	Extracción Total y en millones de metros cúbicos / año	Extracción Permanente	Explotación en exceso	Abatimiento medio Anual (m)	COMENTARIOS
(6) Valle San Quintán	B.C.N.	45	33	12	0.45	El nivel estático ha disminuido hasta alcanzar valores máximos locales del orden de 12 m bajo el nivel del mar. El efecto más notable es la intrusión salina, del mismo que amenaza gravemente el desarrollo de esta región.
(7) Valle El Mocanero	B.C.N.	20	19	1	0.27	Al igual que en el caso anterior, el nivel estático de los acuíferos disminuyó hasta quedar bajo el nivel del mar propiciando la intrusión salina del mismo, que concentra el agua dulce cuyas concentraciones de sólidos totales alcanzan valores de 2500 ppm.
(11) Valle Mexicali	B.C.K.	1200	300	900	0.50	En la porción sur del valle, los niveles dinámicos de los pozos se encuentran bajo el nivel del mar y propician la intrusión del mismo. Se recomienda relocalizar los pozos de la parte sur del valle de Mexicali y en la porción norte de la mesa de San Luis.
(12) Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado	Son.	200	150	50	0.50	La explotación en exceso provoca abatimiento gradual del nivel estático de los acuíferos. El espesor saturado disminuye y las columnas y los costos de bombeo aumentan. La mayor parte del flujo subterráneo proviene de los CUA, que empiezan a aprovecharlo y reducen su disponibilidad en México.
(4) Valle Sanco Domingo	B.C.S.	115	146	130	0.90	Actualmente parte del acuífero tiene abatimientos totales hasta de 9 m. bajo el nivel del mar que provocan intrusión salina del mismo.
(3) Valle La Paz	B.C.S.	26	18	8	0.40	Durante la época de bombeo, los niveles dinámicos se encuentran entre 5 y 30 m. bajo el nivel del mar. Esta situación propicia la intrusión salina del mismo, que amenaza principalmente a los pozos que abastecen a la Cd. de la Paz.
(5) Valle El Vizcaino	B.C.S.	10.1	6.7	0.5	0.81	Los volúmenes bombeados provocan la disminución del volumen almacenado incrementando la duración del flujo y evitando las reservas subterráneas del acuífero.
(8) Valle Ojos Negros	B.C.N.	12.6	11.5	2.1	0.53	Se provoca con el régimen de explotación el descenso gradual de las reservas subterráneas y una creciente concentración de sales disueltas en el agua, al reducir los volúmenes de flujo.
(9) Valle Real del Cielo	B.C.N.	6.5	6	0.5	0.18	Los efectos de bombeo excesivo se manifiestan a muy corto plazo, sinarse intrusión salina.
(2) Valle Todos Santos	B.C.S.	3	0.3	0.3	0.33	Los bombeos superiores a los niveles geodrián facilitar la intrusión salina del mar.
(1) Valle Pescadero	B.C.S.	1.4	1.4	0.2	0.16	Los niveles piezométricos están bajo el nivel del mar, y presenta síntomas de intrusión de agua salada.
(10) Valle de las Palmas	B.C.N.	8	6	2	1.14	El exceso de bombeo ha modificado principalmente en el extremo aguas abajo del río, afectando incluso los volúmenes de escorrentía que capta la Presa Abelardo L. Rodríguez.
(27) Comarca Lagunera	Coab.	1300	938	750	1.70	Actualmente la región está sufriendo debido a que el nivel estático de los acuíferos ha descendido hasta alcanzar los 80 m. de profundidad. Las consecuencias son: disminución del espesor saturado en 50 m. espesamiento y aumento en los costos de bombeo y purificación.

ZONA	ESTADO	Extracción Total millones de metros cúbicos / año	Extracción Permanente	Explotación en exceso	Abastecimiento medio anual (m)	COMENTARIOS
(22) Valle de Villa Ahumada	Chih.	180	97	123	-	Abatimiento local del nivel estático en los valles Ahumada de Peña Juárez y Villa Ahumada. Se recomienda relocalizar las zonas de bombeo para poder continuar con el ritmo de explotación actual.
(25) Valle Ahumada	Chih.	54	45	9	-	Actualmente es zona de veda. Sin embargo, la explotación continúa debido a que la agricultura depende casi en su totalidad del agua subterránea. Las consecuencias son: Disminución del espesor saturado e incremento en las columnas y castas de bombeo.
(24) Valle Janos (Casas Grandes)	Chih.	111	110 (7)	1 (2)	1.00	El nivel estático acusa un descenso progresivo. Sin embargo, el fuerte espesor del acuífero (100 m) permite que el ritmo de explotación actual continúe hasta que el costo del bombeo se vuelva prohibitivo.
(21) Valle Juárez (Cd. Juárez)	Chih.	30	14	14	0.60	El acuífero que abastece de agua a Cd. Juárez ha registrado aumentos de nivel estático que van de 0.50 a 2 m. Las consecuencias son: Disminución del espesor saturado e incremento en los costos de bombeo que hacen difícil el abastecimiento a esta ciudad.
(23) Valle Janos (Janos)	Chih.	73	40	33	1.00	Aunque la información disponible es escasa, se sabe que esta zona está explotada en exceso. El nivel estático ha descendido paulatinamente causando disminución en el espesor saturado e incremento en los costos de bombeo que hacen difícil el abastecimiento a esta ciudad.
(26) Valle Jiménez Camargo (Río Tlaxiaco)	Chih.	238	224	14	0.60	El nivel estático se ha abatido. Sin embargo, la explotación en exceso es local y se puede disminuir si se relocalizan las zonas de bombeo.
(35) Valle de México	D.F. México Nueva Léon Tlaxcala Veracruz	238	-	-	-	La explotación excesiva del agua subterránea ha ocasionado el hundimiento de la Cd. de México. La velocidad media de dicho hundimiento fue de 8 cm/año para el período de 1943-49 y el máximo total registrado fue de 0.8 m. (Cruce de Av. Juárez y Reforma)
(22) Valle - Coahuila	Coa.	250	170	80	1.60	En el período 1966-70, se produjeron los mayores abatimientos debido al incremento desmedido en la extracción. En la actualidad esta zona está vedada y se recomienda disminuir la explotación e iniciar varias campañas de descenso del nivel estático.
(30) Valle de León	Coa.	157	65	92	1.40	La explotación excesiva de los acuíferos ha originado abatimientos muy rápidos y se localizan al sur de la Cd. de León.
(21) Zona Laguna Seca	Coa.	64	37	34	0.90	Actualmente existen dos zonas con abatimientos locales. Una es Dr. Mora-San Ignacio Huastla y la otra es Laguna Seca. Sin embargo, la región que presenta mayores problemas es la parte norte de Laguna Seca, que ha reducido su aportación al río de Leona.
(34) Valle de Toluca	Méx.	110	340	170	1.50	El nivel estático del acuífero freático se ha abatido hasta alcanzar máximos del orden de 7 m. (Prosa Alzate). En el acuífero confinado el abatimiento total máximo ha sido de 17 m. Si se continúa con el ritmo de extracción actual el nivel se abatirá hasta 70 m (1976).

Continuación, 2/1

ZONA	ESTADO	Explotación Total Millones de metros cúbicos	Explotación Permanente	Explotación en exceso / año	Abastecimiento medio anual (m ³)	COMENTARIOS
(53) Valle Querétaro	Oro.	130 a 278	76-180	54 a 120	1.30	La explotación excesiva de los acuíferos de este valle ha provocado el descenso progresivo del nivel estático. El abastecimiento máximo registrado en el período 1965-71 fue de 11 m y se localizó en la zona urbano-industrial de la Cd. de Querétaro, hecho que hizo todo acerca del uso del agua subterránea.
(20) Marcan Igüerda del Río Sinaloa	Sin.	300	250	50	1.50	El nivel estático se está localmente reduciendo al estar saturado de los acuíferos. Debido a la intersección del acuífero residual superficial del Río Sinaloa cuando se construye la Pasa Sinaloa de Leyva el espacio saturado se reducirá aún más.
(17) Costa de Hermosillo	Son.	850	350	500	2.00	El efecto causado por la explotación en exceso ha sido el descenso general del nivel estático que actualmente se encuentra bajo el nivel del mar. Esta situación propicia la intrusión salina, disminuye el espesor saturado de los acuíferos y aumenta las columnas y los costos.
(16) Valle El Sahuaral	Son.	140	70	70	2.00	Los efectos causados por la explotación en exceso son semejantes a los de la Costa de Hermosillo con la diferencia de que en esta zona no existe intrusión salina del mar.
(19) Valle de Guaymas	Son.	180	100	80	1.60	Esta zona es la que sufre los efectos más graves de la explotación en exceso, ya que además de los efectos en la Costa de Hermosillo la calidad del agua subterránea se ha deteriorado en some áreas y alcanza concentraciones de sólidos disueltos los de orden de 6000 ppm.
(18) Valle San José de Guaymas	Son.	15	7	8	1.70	Los efectos más desfavorables originados por el abastecimiento general del nivel estático son: intrusión salina del mar, reducción del espesor saturado, incremento en las columnas y costos de bombeo y contaminación del agua dulce que alcanza concentraciones del orden de 1000 ppm. (sólidos disueltos).
(15) C. Río Magdalena (Coyote Costa)	Son.	214	114	100	1.00	El nivel estático se encuentra actualmente bajo el nivel del mar ayudando así a la intrusión salina que contamina los acuíferos de agua dulce. La concentración de sólidos totales alcanza valores del orden de 2000-3000 ppm. Las columnas y los costos de bombeo se incrementan.
(14) C. Río Magdalena (Valle Bisani)	Son.	90	100	90	1.00	Los principales efectos producidos por el abastecimiento del nivel estático son: Reducción del espesor saturado de los acuíferos e incremento en las columnas y en los costos del bombeo.
(15) C. Río Magdalena (Piquito-Catorca)	Son.	77	29	48	0.90	Al oeste de la Cd. de Catorca se localizó el máximo abatimiento que fue de 8 m. (1970-73). Las consecuencias de estos descensos son semejantes a las señaladas para el valle Bisani.
(29) Valle Ixtoto	Zac.	47	30	17	0.40	La parte sur del valle tiene explotación en exceso. El origen de lo anterior es la concentración de pozos en los alrededores de la población de Ixtoto, no se recomienda aumentar la explotación actual.
(28) Valle Colera	Zac.	180	100	80		El abatimiento del nivel estático ha afectado a casi todo el valle. Los máximos descensos son del orden de 17 m y causan reducción del espesor saturado de los acuíferos y aumento en las columnas y en los costos de bombeo.

Continúa en 3/3

distancias mayores del litoral en el caso de acuíferos costeros. Una herramienta que cada vez se aplica más en México, es el uso de modelos de predicción del comportamiento de los acuíferos, ya que con ellos ha sido posible plantear alternativas de explotación que permiten definir las más convenientes, tanto en el aspecto geohidrológico como en el económico.

Dentro de los aspectos relacionados con el manejo del agua subterránea, existe otro tipo de problemas de carácter político y social que obligan a modificar las restricciones técnicas que se plantean para preservar el recurso; este tipo de problemas se han resuelto mediante campañas de concientización en las que juega un papel muy importante la participación de los usuarios; de donde han surgido propuestas para establecer un reglamento legal y administrativo para la explotación de acuíferos.

Entre las principales disposiciones institucionales referentes a las aguas del subsuelo, que constan en nuestra Ley Federal de Aguas, se establece:

Primero. Las aguas son propiedad de la Nación.

Segundo. El Organismo regulador respecto a la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas es la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

Tercero. Llevar un registro permanente respecto al aprovechamiento del agua subterránea para regular su explotación.

Cuarto. Por interés público se decretan zonas de veda para el control de la extracción y utilización de las aguas del subsuelo, debiéndose instalar medidores y demás

accesorios para determinar gastos, volúmenes y niveles.

Quinto. Las zonas de veda se reglamentarán para fijar los volúmenes de extracción que se autoricen, así como las disposiciones que se requieran.

Sexto. Realización de obras de recarga artificial en los acuíferos que sea factible y que así lo requieran.

Séptimo. Establecimiento de medidas para preservar la calidad del agua subterránea.

Además de las acciones que hasta ahora se han adoptado para manejar el agua subterránea, se han propuesto para mejorar el uso racional de los acuíferos, las siguientes políticas:

Primera. Proveer los elementos técnicos e institucionales necesarios para regular firmemente las aguas subterráneas.

Segunda. Concluir el inventario de la disponibilidad de aguas subterráneas y mantenerlo actualizado. Continuar los estudios de gran visión, detallados e interdisciplinarios.

Tercera. Identificar las posibilidades y establecer los mecanismos para cambiar el uso del agua superficial y subterránea de una actividad a otra que ofrezca mejores perspectivas sociales y económicas.

Cuarta. Aliviar problemas de sobreexplotación de acuíferos implantando técnicas de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas y recarga artificial.

Quinta. Reforzar la toma sistemática de información simultáneamente con la explotación de los acuíferos, cubriendo aspectos cuantitativos y de calidad.

Sexta. Establecer la coordinación entre dependencias que manejan información hidro-

lógica en todos sus aspectos, y uniformizar y hacer disponible la información que se reúna mediante bancos de información.

Séptima. Apoyar el uso eficiente del agua y la reducción de la explotación excesiva.

Octava. Promover la mayor participación y cooperación de los usuarios en la selección e implantación de programas para el aprovechamiento del agua subterránea.

Novena. Restringir la descarga de desechos, tanto en la superficie como en el subsuelo, de acuerdo a las características de los sistemas de flujo de aguas subterráneas de tal forma que se garantice la calidad del agua de los acuíferos.

Décima. Establecer "distritos de manejo o conservación de acuíferos" que impulsen la correcta implantación de las políticas propuestas y que consideren la naturaleza regional o local de los problemas derivados de la explotación excesiva o intensiva de las aguas subterráneas.

- 1 VALLE PESCADEROS
- 2 VALLE TODOS SANTOS
- 3 VALLE LA PAZ
- 4 VALLE SANTO DOMINGO
- 5 VALLE EL VIZCAINO
- 6 VALLE SAN QUINTIN
- 7 VALLE DE MANADERO
- 8 VALLE OJOS NEGROS
- 9 VALLE REAL DEL CASTILLO
- 10 VALLE LAS PALMAS
- 11 VALLE DE MEXICALI
- 12 MESA ARENOSA DE SAN LUIS
- 13 COYOTE COSTA
- 14 VALLE BISANI
- 15 PITIQUITO - CABORCA
- 16 VALLE EL SÁNUARAL
- 17 COSTA DE HERMOSILLO
- 18 SAN JOSE GUAYMAS
- 19 VALLE DE GUAYMAS
- 20 MARGEN IZQUIERDA DEL RIO SINALOA
- 21 VALLE DE JUAREZ
- 22 VALLE VILLA AHUMADA
- 23 VALLE DE JANDS
- 24 CASAS GRANDES
- 25 VALLE ALDAMA
- 26 VALLE JIMENEZ CAMARGO
- 27 COMARCA LAGUNERA
- 28 VALLE GALERA
- 29 VALLE DE LORETO
- 30 VALLE DE LEÓN
- 31 ZONA DE LAGUNA SECA
- 32 BAJIO CELAYA
- 33 VALLE DE QUERETARO
- 34 VALLE DE TOLUCA
- 35 VALLE DE MEXICO



Lámina 1 Zonas con problemas de explotación excesiva del agua subterránea en la República Mexicana.

5.2 Extracción permanente y explotación racional del almacenamiento

Como se mencionó en el inciso anterior, el manejo de los acuíferos debe referirse a su comportamiento expresado como respuesta a la explotación que de ellos se realiza. Cuando ésta excede la extracción permanente se presenta la sobreexplotación que puede considerarse negativa ó positivamente según se permitan o no los ya citados efectos destructivos.

La extracción permanente, rendimiento seguro o recarga aprovechable, se definió como el máximo volumen de extracción que no produce abatimiento indefinido ni daños irreparables al acuífero.

El cálculo de la extracción permanente se deriva del balance de aguas subterráneas y toma en consideración los valores medios de las aportaciones como son el flujo subterráneo y la recarga, vertical por infiltración en la red de aguas superficiales, cantidades que de alguna manera son un reflejo de la variación de la precipitación.

El hecho de que se tengan años con recarga inferior a la media favorece una sobreexplotación que puede ser aceptable de acuerdo con las características del acuífero, sobre todo tomando en cuenta que en años de mayor precipitación se tendrá una recuperación que restablecerá los niveles del agua.

En cuencas con niveles freáticos someras es recomendable el abatimiento de dichos niveles mediante extracción adicional temporal, porque de ello puede derivarse un incremento en la extracción permanente al rescatar los volúmenes que originalmente se evapotranspiraban.

En algunos casos el abatimiento continuo de los niveles del agua en el acuífero se asocia con sobreexplotación, lo que puede ser erróneo y tratarse tan solo de una excesiva concentración del bombeo, que se resuelve distribuyendo mejor los pozos de explotación.

Aprovechar la capacidad de almacenamiento de un acuífero desde un punto de vista positivo representa grandes ventajas, dado que es como hacer uso de un capital que se tiene guardado, y significa un conocimiento de las condiciones físicas, administrativas, sociales, económicas, legales y políticas que ello representa. (Ref. 12).

Algunas consideraciones sobre estos aspectos son las siguientes:

Entre las condiciones físicas se destaca la cantidad de agua almacenada, su calidad, el tipo de acuífero y sus fronteras. De aquí se obtienen los elementos que permiten tomar una decisión apropiada en cuanto a sobreexplotar sin agotar las reservas e inutilizar el acuífero, mediante reducción de la extracción combinada con etapas de recuperación (Ref. 13). Estas pueden depender de la aportación de fuentes alternativas o por extracciones inferiores a la permanente y el auxilio de recarga artificial.

Importar agua de cuencas vecinas puede ser una solución a la sobreexplotación, aun cuando hasta ahora no lo es para el uso agrícola aisladamente.

En los aspectos sociales y económicos interviene el uso que se le da al agua como base de sustentación de las actividades productivas de una región, por lo que no puede permitirse la pérdida de ese recurso básica. El cambio en el uso del agua, esbozado anteriormente, implica un problema social en cuanto a ocupación, generalmente de agricultores que necesitarán pasar del sector primario, tal vez, al industrial, si es esta la actividad que inicia la extracción del agua.

El crecimiento de las ciudades ó la implantación de las industrias desplazan a la agricultura, además de que económicamente el uso urbano-industrial del agua permite cargas de bombeo superiores a las del sector agropecuario, por lo cual debe planearse y reglamentarse cuidadosamente esta transferencia de uso (Ref. 14).

5.3 Recarga artificial

Se ha insistido mucho en los últimos años en la conveniencia de llevar a cabo programas de recarga artificial, lo cual indudablemente es positivo, siempre y cuando no se forjen ilusiones sobre los resultados que puedan alcanzarse, ni se pierdan de vista las circunstancias y limitaciones que cada sitio en particular impone.

Pensar que la recarga artificial sea la solución a los graves problemas de sobreexplotación que se padece en más de 30 sitios en el país, sería una quimera, pues en la mayoría de los casos el problema lo constituye la escasez misma de agua para usos primordiales con cuanto mayor razón para recargarla como sucede en la mayor parte de las zonas áridas, en otras viene a ser su calidad, fuertemente deteriorada, como en el

Valle de México y en algunos lugares la necesidad de construir grandes obras para regular los caudales torrenciales y dar lugar al proceso de infiltración, como en los acuíferos de las regiones Pacífico-Centro y Golfo de México.

Entre los métodos de recarga artificial se tienen: cauces de ríos ó arroyos, canales ó drenes permeables, superficies de inundación, desviación de cauces, ramales a base de zanjas, vasos escalonados, pozos de absorción, etc. (Ref. 15).

La selección del método depende de las condiciones hidrológicas de la localidad, entre las que deben considerarse los suelos. Es así como suelos impermeables hacen pensar en la necesidad de pozos, con una serie de estructuras auxiliares como son presa para regular escurrimientos, conducciones y filtros.

Para llevar a cabo un programa de recarga artificial (Ref. 16), puede ser conveniente iniciarlo mediante proyectos piloto que permitan probar la eficiencia del método en un sitio específico. Asimismo se hace necesario medir los volúmenes y la calidad de agua disponible para infiltración, perforar pozos de observación, efectuar reconocimientos geológicos y emplear trazadores (sal común), "para medir el tiempo de residencia y de la disolución del agua inyectada".

6.- Análisis de la Curva de Recesión, (Vaciado) ó Decaimiento de un Hidrograma.

(ref. 9, 10 y 11)

La forma de un hidrograma puede verse afectada por diversos factores, como la distribución de la lluvia en la cuenca, la forma de ésta etc.

Cuando la posición del nivel freático de un acuífero permite la descarga de este en el cauce de un río, se presenta el flujo base, que es de origen subterráneo exclusivamente, a diferencia del flujo ó escurrimiento directo provocado por la precipitación directa sobre el terreno.

En un río no controlado por presas u otras obras de extracción por derivación ó bombeo, puede realizarse un análisis del hidrograma de sus escurrimientos, con lo que es posible obtener una cifra aproximada del volumen descargado por un acuífero en la época de estiaje y calcular asimismo el volumen aproximado de recarga en un período de lluvias. Para esto se efectúa el análisis de la denominada etapa de recesión ó decaimiento del hidrograma:

Determinación de volúmenes en un Hidrograma

Caudal de Flujo Base "Qt" en un tiempo cualquiera durante el estiaje que da representado por:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

donde:

Q_0 = Caudal inicial del flujo base (caudal al inicio del estiaje), también representa la descarga en un tiempo dado t .

Q_t = Descarga "t" unidades de tiempo después de T (caudal a la terminación del estiaje).

$e^{-\alpha}$ = Factor de recesión diaria.

α = Coeficiente de agotamiento expresado en días, depende de la naturaleza geológica y de la morfología de la cuenca vertiente.

$$\log Q_t = \log Q_0 - \alpha t \log e$$

a) $\frac{\log Q_t}{\log Q_0} = \log e^{-\alpha t}$ pero $\log e^{-\alpha t} = -\alpha t \log e$ (propiedad de los logaritmos)

$$\frac{\log e}{2.3} = \frac{1}{2.3} \quad (\text{propiedad de los logaritmos})$$

por lo tanto $\log e^{-\alpha t} = -\frac{\alpha t}{2.3}$ b)

Sustituyendo b) en a)

$$\log Q_t - \log Q_0 = \frac{-\alpha t}{2.3}$$

despejando α nos queda:

$$\alpha = \frac{2.3 (\log Q_0 - \log Q_t)}{t} \Rightarrow \alpha = \frac{2.3}{t}$$

t = Diferencia de tiempo (tiempo transcurrido desde la aparición de Q_0)

$$V_0 \text{ descarga} = \frac{Q_0 - Q_t}{\alpha} \quad (1) \quad V_0 = \frac{Q_0}{\frac{2.3}{t_0}} = \frac{Q_0 t_0}{2.3}$$

V_t = Volumen descargado por el acuífero = $\frac{Q_t t}{2.3}$ que equivale a un almacenamiento del acuífero

V_0 = Volumen almacenado al inicio del período de estiaje = $\frac{Q_0 t_0}{2.3}$

$$E_R = \text{Escorrimento del flujo base} = \left[\frac{Q_{02} + Q_{t1}}{2} \right] t_R$$

V_R = Recarga: diferencia de almacenamientos entre la terminación del estiaje V_{t1} y el inicio del siguiente V_{02} . Representa el volumen de recarga que recibieron los acuíferos durante la época de lluvia.

$$V_R = \frac{V_{02} - V_{t1}}{\Delta V_R} + E_R = \Delta V_R + E_R \quad \text{donde } \Delta V_R = \text{Cambio de almacenamiento.}$$

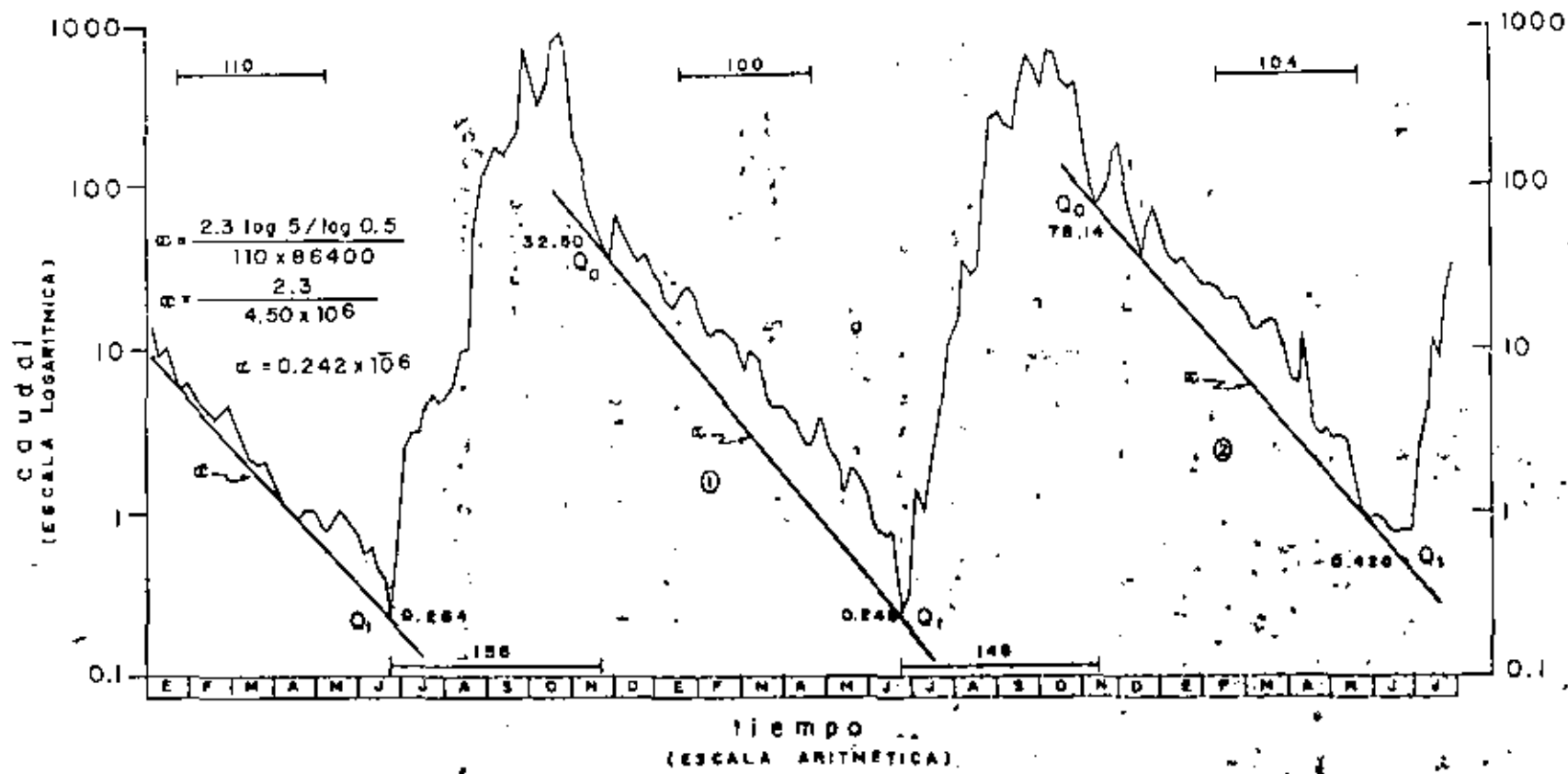
V_{02} = Volumen almacenado al iniciar el estiaje siguiente

V_{t1} = Volumen almacenado al terminar el estiaje anterior

Q_{02} = Caudal de iniciación del flujo base del estiaje siguiente

Q_{t1} = Caudal de terminación del flujo base del estiaje anterior

t_R = Duración de la recarga o tiempo transcurrido entre Q_{t1} y Q_{02}



①

②

$$\alpha = \frac{2.3 \log 10 / \log 1.0}{100 \times 86400} = \frac{2.3}{8.64 \times 10^6} = 0.266 \times 10^{-6}$$

$$V_0 = \frac{32.50 - 0.248}{0.266 \times 10^{-6}} = 121.248 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$V_1 = \frac{0.264 \times 9.50 \times 10^6}{2.3} = 1.090 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$V_0 = \frac{32.50 \times 8.64 \times 10^6}{2.3} = 122.087 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$E_R = \left(\frac{32.50 + 0.264}{2} \right) 156 \times 86400 = 223.633 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$V_R = (122.087 - 1.090 + 223.633) \times 10^6 = 344.630 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$\alpha = \frac{2.3 \log 10 / \log 1.0}{104 \times 86400} = \frac{2.3}{8.98 \times 10^6} = 0.256 \times 10^{-6}$$

$$V_0 = \frac{78.14 - 0.420}{0.256 \times 10^{-6}} = 303.594 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$V_1 = \frac{0.248 \times 8.64 \times 10^6}{2.3} = 0.932 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$V_0 = \frac{78.14 \times 8.98 \times 10^6}{2.3} = 305.086 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$E_R = \left(\frac{78.14 + 0.248}{2} \right) 148 \times 86400 = 501.181 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$V_R = (305.086 - 0.932 + 501.181) \times 10^6 = 805.335 \times 10^6 \text{ m}^3$$

BIBLIOGRAFIA

- 1.- De Wiest Roger J.M. Geohydrology John Wiley and Sons, 1967.
- 2.- Todd David Keith Ground Water Hidrology. John Wiley and Sons.
- 3.- Walton William C. Ground Water Resource Evaluation Mc. Graw Hill, 1970.
- 4.- Hantush Mahdi J. Advance in Hidrosience. Hydraulics of wells Ven Te Chow. Academic Press.
- 5.- Johnson Division Ground Water and Wells. Edward E. Johnson Inc. 1966. El Agua Subterránea y los pozos.
- 6.- Davis y De Wiest Hydrogeology Wiley and Sons. 1966
Hidrogeología. Versión Castellano de: Fca. J. Martínez, Ed. Ariel. 1971
- 7.- Lohman S. W. y otras
Recopiló Rafael Portugal (q.e.p.d.) Definiciones de términos seleccionados de Aguas Subterráneas. Levantamiento Geológico (U.S. Geological Survey). Comité de Redefinición de Términos de Aguas Subterráneas. 1970.
- 8.- Sotelo Avila Gilberto Hidráulica General.- Primera Parte-LIMUSA 1979.
- 9.- Meyboom Prediction methods. Estimating ground water recharge from Stream Hydrographs. Journal of Geophysical Researc Vol. 66 No. 4, 1961
- 10.- Kunkle George The base-duration curve. Atechnique for the study of ground water discharge from drainage basin. Journal of geophysical Research Vol. 67 No. 4, 1962.

- 11.- Mero F.
Application of the ground water depletion curves in Analysing and forecasting spring discharges in flunced by well fields. Extract of publication No. 63 of the S.A.P.H., Symposium of Surface Waters.
- 12.- Maxey George B., Keith John, Hess John, Shulke Dale
Legal, Economic, Social and Management Aspects of Selected Ground Water Mining Areas in the United States. Water Resources Center, Desert Research Institute, University of Nevada System. Preparado para el Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas y para el P.N.H., S.R.H., Reno, Nevada, 1975.
- 13.- Mandel S., Kahana Y., Kally E., Zhitfan Z., Schwarz J.
The Mining of Ground Water Resources as a Tool for Regional Development. Tahal Consulting Engineers LTD, preparado para el Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas y para el P.N.H., S.R.H. Tel. Aviv, 1975.
- 14.-
Plan Nacional Hidráulico, Primera Parte, Cap. II; Segunda Parte, Cap. XII, 1975.
- 15.-
Infiltración Artificial en la Cuenca del Valle de México. Oficina de Estudios Especiales de la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, SRH, Publicación No. 3, 1963
- 16.-
Proposición de Estudios de Recarga Artificial de los Acuíferos del Valle de México. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, D.D.F., 1978.



centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



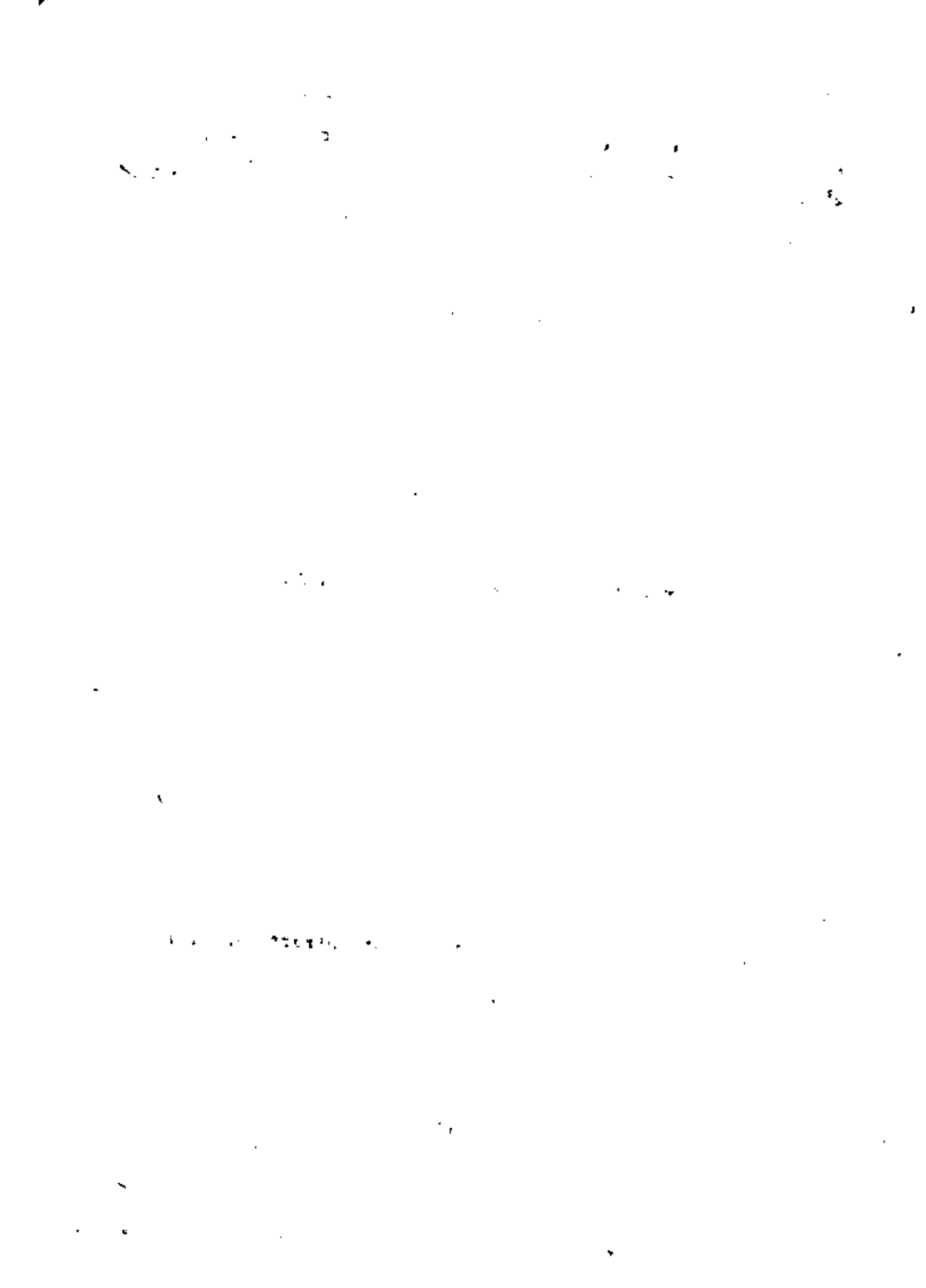
EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS

DE AGUA SUBTERRANEA

METODOS HIDROMETRICOS DE INVESTIGACION

Ing. Arturo Difurt Candelaria

julio, 1980



METODOS HIDROMETRICOS DE INVESTIGACION

por

Ing. Arturo Difunt Candelaria*

INTRODUCCION

- I.1) Precipitación
 - I.1.1) Tipos de precipitación
 - I.1.2) Medición de la precipitación
 - I.1.3) Hietograma
 - I.1.4) Técnicas de análisis de los registros de lluvias
- I.2) Evaporación
 - I.2.1) Medición de la evaporación
- II.1) Evapotranspiración
 - II.1.1) Métodos para evaluar la transpiración
- III.1) Métodos para la estimación del balance de agua
 - III.1.1) Balance hidrometeorológico

PRINCIPIOS DE HIDROLOGIA SUPERFICIAL

-
- IV.1) Relación lluvia-escorrimento
 - IV.1.1) Correlación entre precipitación y escurrimento
 - IV.1.2) Proceso de infiltración
 - IV.1.3) Índice de infiltración
 - IV.1.4) Hidrograma unitario
 - IV.1.5) Hidrograma unitario sintético
 - V.1) Escorrimento
 - V.1.1) Hidrograma de una corriente
 - V.1.2) Tiempos de concentración
 - VI.1) Período de retorno

* Jefe de Proyecto, Dirección de Inventarios de Agua y Suelo, CPNH.

- VII.1) Conceptos básicos de estadística y metodologías de aplicación de varias funciones de distribución
- VII.1.1) Conceptos de probabilidad
- VII.1.2) Distribución de probabilidades acumuladas
- VII.1.3) Funciones de distribución de una variable aleatoria continua
- VII.1.4) Función de distribución de probabilidades acumuladas
- VII.1.5) Fórmulas de los principales parámetros estadísticos
- VII.1.6) Funciones de distribución de probabilidades
- VII.1.6.1) Distribución de valores extremos Tipo I o Gumbel Simple
- VII.1.6.2) Distribución Log-Pearson Tipo III
- VII.1.6.3) Distribución de frecuencias aplicadas a dos poblaciones

TECNICAS DE MEDICION E INSTRUMENTACION

- VIII.1) Piezómetros
- VIII.2) Pruebas de bombeo
- VIII.3) Medidas del caudal en ensayos de bombeo
- VIII.4) Mediciones del nivel del agua
- VIII.5) Aforo de corrientes
- VIII.6) Métodos de aforo.

INTRODUCCION

El principal objeto de este tema es el de conocer en base al desarrollo del ciclo hidrológico, los métodos de medición para los recursos de agua en sus diferentes manifestaciones, las cuales son de vital importancia para poder hacer una cuantificación de los recursos de agua superficial y subterránea.

Se describe en esta introducción el ciclo hidrológico, para posteriormente en cada uno de los capítulos, estudiar por separado cada término de este ciclo, así como sus métodos de medición; por último se presentan técnicas de medición e instrumentación para determinar los parámetros tanto de hidrología superficial como subterránea.

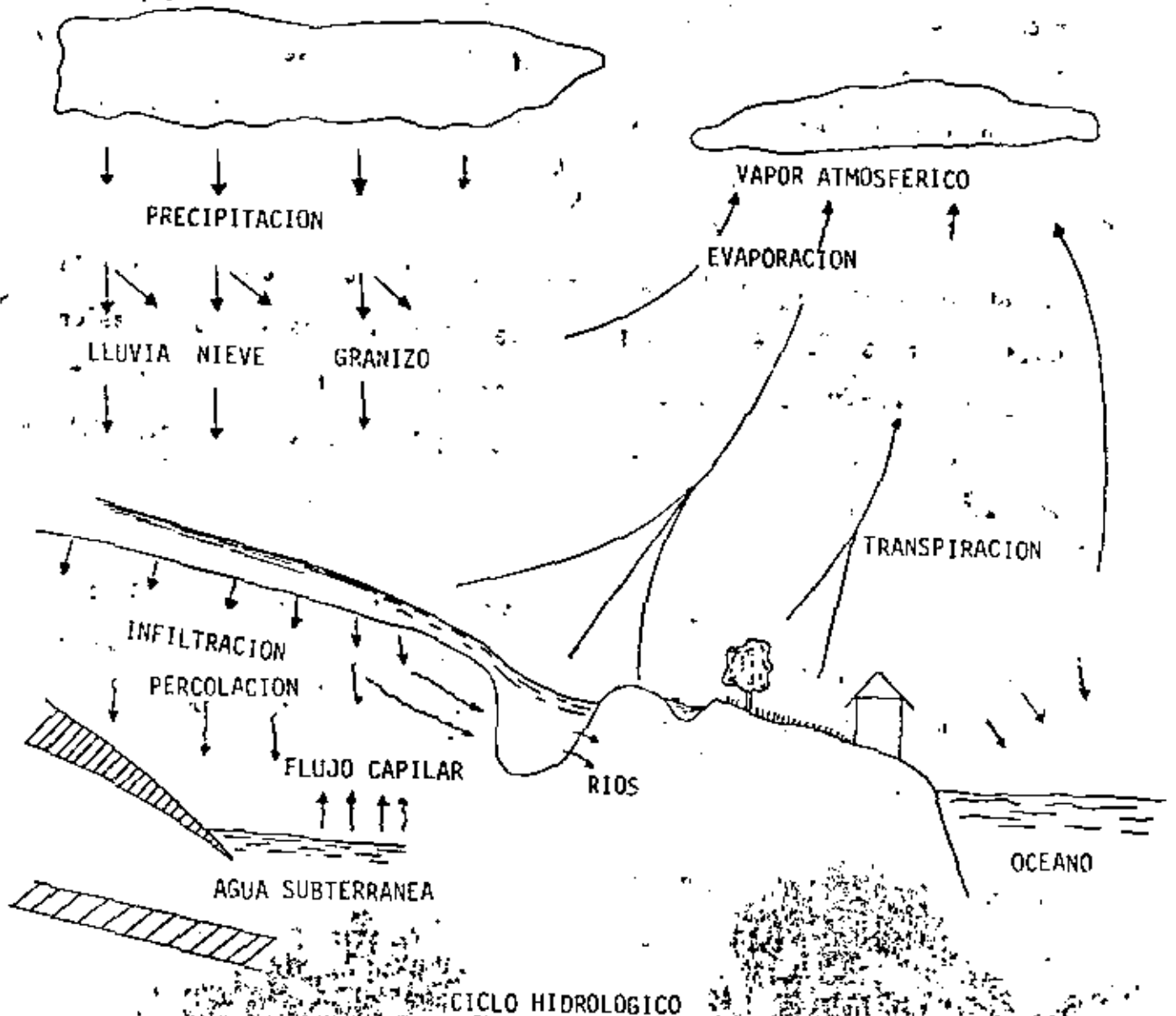
La Hidrología estudia los fenómenos hidrometeorológicos que gobiernan a las precipitaciones y a los escurrimientos que determinan las sequías y las grandes crecientes, estudia también la modificación que sufre el escurrimiento producido por la evaporación, accidentes topográficos, constituyentes del suelo y alteraciones artificiales.

El abastecimiento mundial de agua dulce se obtiene generalmente de la precipitación, la cual proviene de la evaporación del agua de mar. El proceso de intercambio de humedad del mar a la tierra y viceversa, se conoce como ciclo hidrológico.

DESCRIPCION DEL CICLO HIDROLOGICO

La primera etapa del ciclo hidrológico es la evaporación del agua en los

océanos, este vapor es llevado sobre los continentes por las masas de aire en movimiento. Si el vapor es enfriado se condensa formando gotas pequeñas que forman nubes, en condiciones meteorológicas propias, estas gotas se agrandan y caen como precipitación o lluvia; unas dos terceras partes de la precipitación que llega a la superficie terrestre regresa a la atmósfera por la evaporación del agua, del suelo y de la vegetación y por la transpiración de las plantas. La tercera parte restante regresa finalmente al océano por conductos superficiales.



Precipitación

I.1) Agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico y que proviene de la atmósfera.

I.1.1) Tipos de precipitación

Para que se origine la precipitación es necesario que una parte de la atmósfera se enfríe, hasta que el aire se sature con el vapor de agua, originándose condensación del vapor atmosférico; dicho enfriamiento de la atmósfera se logra con la elevación del aire caliente que puede ser: convectiva, orográfica y ciclónica.

Precipitación convectiva

Se origina por el movimiento ascendente del aire caliente del medio que lo rodea, tal elevación puede tener los siguientes orígenes: calentamiento de la capa de aire en contacto con el suelo, enfriamiento por alguna causa de las capas de la atmósfera o bien levantamiento mecánico sobre un frente de aire frío. Esta lluvia ocurre en forma de chubascos.

Precipitación orográfica o de relieve

Esta precipitación es causada por la elevación sobre las montañas del aire caliente situado a niveles inferiores.

Generalmente estas lluvias son de baja intensidad y amplia distribución. Las barreras orográficas, sirven como trampolines para el aire caliente, razón por la cual siempre se tiene mayor precipitación en el aire a favor del viento, teniendo lo inverso en la vertiente contraria.



Precipitación orográfica



Precipitación convectiva



Precipitación ciclónica

(frente frío)



Precipitación ciclónica

(frente caliente)

Lluvia ciclónica

Los ciclones son de dos clases: tropicales y extratropicales según si tienen origen en la faja tropical o fuera de ésta.

Los ciclones son grandes masas de aire cargadas de vapor de agua y animados con dos movimientos: uno de vortice y otro de traslación. La precipitación ciclónica se divide en dos clases: la no frontal y la frontal.

Precipitación ciclónica no frontal

Este tipo de precipitación se presenta en cualquier clase de depresión barométrica, pues el aire caliente puede ser remontado a las alturas por la conver

gencia horizontal que resulta del flujo del aire hacia la zona de baja presión.

Precipitación ciclónica frontal

Esta precipitación resulta cuando la masa de aire caliente es elevada sobre la de aire frío. Se tienen dos variantes:

Lluvia de frente caliente

Se forma en el aire caliente que se mueve hacia arriba sobre la cama del aire frío, según este avanza. Son lluvias ligeras de larga duración y que pueden abarcar hasta 300 km adelante del frente frío.

Lluvia de frente frío

Esta lluvia en contraste se tiene al final del aire frío, se presenta a manera de chubasco y se produce cuando el aire caliente es forzado a las alturas según se desplaza la cama del aire frío.

1.1.2) Medición de la precipitación

La cantidad de precipitación se expresa como altura o lámina en mm que cae sobre el terreno. Esta cantidad de lluvia se mide en un recipiente abierto de paredes verticales llamado pluviómetro.

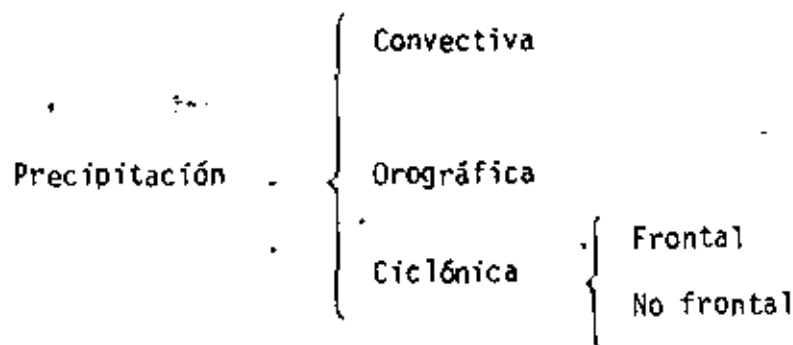
Aparatos de medición

El pluviómetro es un recipiente cilíndrico de aproximadamente 20 cm de diámetro y 60 cm de alto en el cual la tapa es un embudo receptor que descarga en una probeta graduada cuya área es del 10% del área del embudo, por lo anterior, al leer 1 cm de lluvia en la probeta se tendrá en la realidad 1 mm

de lluvia. Generalmente se acostumbra tomar las lecturas cada 24 horas.

1.1.3) Hietograma

Se define como hietograma a la gráfica que indica la variación de la altura de lluvia con respecto a un intervalo de tiempo, el cual se escoge arbitrariamente y de acuerdo a las condiciones específicas del estudio.



1.1.4) Pluviógrafo

Por medio de este aparato se lleva un registro de altura de lluvia, contra tiempo. Los más comunes son de forma cilíndrica, y el embudo receptor está ligado a un sistema de flotadores, que originan el movimiento de una aguja sobre un papel registrador montado en un sistema de reloj. Como el papel registrador tiene un cierto rango de variación en cuanto a la altura del registro, una vez que la altura llega al borde superior, automáticamente regresa al borde inferior y sigue registrando.

Utilizando el pluviógrafo se conoce la intensidad de precipitación i , que se define como la altura de precipitación entre el tiempo en que se originó.

Para conocer la distribución y la precipitación media de una tormenta en una

determinada zona, se requiere de varias estaciones pluviométricas o pluviográficas, localizadas convenientemente.

1.1.4) Técnicas de análisis de los registros de lluvias

Precipitación media sobre una zona

En muchos problemas hidrológicos se requiere conocer la altura de precipitación media en una zona, ya sea durante una tormenta, una época del año o un periodo de tiempo determinado. Para hacerlo se tienen tres criterios.

- a) Promedio aritmético
- b) Método de Thiessen
- c) Método de isoyetas.
- d) Promedio aritmético.

Para calcular la precipitación media, únicamente se suma la altura de lluvia registrada en un cierto tiempo en cada una de las estaciones localizadas dentro del área, y se divide entre el número total de estaciones. A mayor número de estaciones, mayor precisión.

$$hp_m = \frac{\sum h_i}{N}$$

h_i = Altura de lluvia en la estación;

N = Número de estaciones.

- b) Método de las áreas de influencia o de los polígonos de Thiessen.

- En una cuenca en la cual dentro y cerca de ella se tienen tres o más estaciones con un amplio periodo de observaciones, conviene usar el método de los polígonos de Thiessen.

El procedimiento consiste en unir las estaciones adyacentes con líneas rectas - formando triángulos, en seguida se trazan perpendiculares a cada línea de conexión, estas perpendiculares bisectan a las líneas que unen las estaciones; el polígono formado por los bisectores alrededor de la estación forma el área de influencia de la misma, para calcular la altura de precipitación media (hpm), se suman los productos del área de influencia de cada estación por la precipitación media anual de esta y se divide la sumatoria de este producto, entre el área de la cuenca; es decir:

$$hpm = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{A}$$

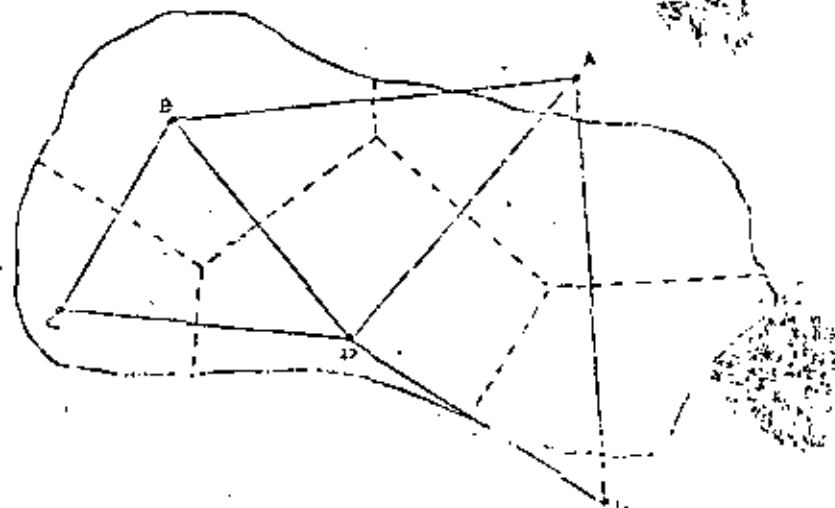
Donde;

A_i = Área tributaria de la estación,

P_i = Precipitación de la estación i , en el periodo de estudio o durante una tormenta, en mm.

A = Área de la cuenca

Ej:



Áreas de influencia de las estaciones

Est	Áreas (Km ²)	Precipit. P: (mm)	Ai Pi
A	30.0	100.0	3000.0
B	350.0	200.0	70000
C	260.0	250.0	65000
D	300.0	260.0	78000
E	100.0	400.0	40000
	1040.0		250000

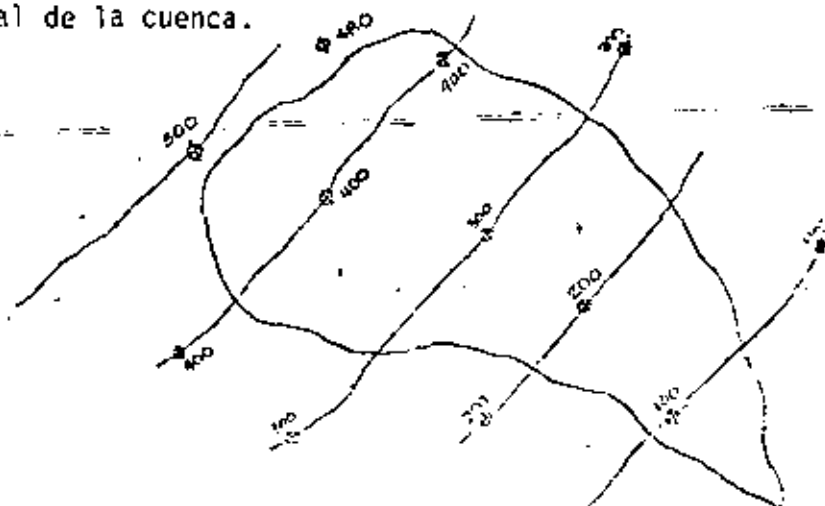
$$h_{pm} = \frac{\sum A_i P_i}{\sum A} = \frac{250000}{1040} = 240.15 \text{ mm}$$

Método de las curvas isoyetas

Cuando se tienen suficiente número de estaciones dentro de una cuenca, conviene usar el método de las curvas isoyetas:

El procedimiento es el siguiente: se forman isoyetas de acuerdo a los valores de la precipitación media anual de cada estación, se calculan las áreas limitadas por las isoyetas formadas y el parteaguas, multiplicándose cada una de éstas áreas por la precipitación media entre isoyetas, se suman los productos y se divide entre el área total de la cuenca.

Ej:



- A1 (400) = Y1
- A2 (300) = Y2
- A3 (200) = Y3
- A4 (100) = Y4
- A5 (50) = Y5

$$h_{pm} = \frac{\sum X}{A}$$

1.2) Evaporación

Es el resultado del proceso físico, por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando, directamente, a la atmósfera en forma de vapor. Es decir las moléculas del agua en un recipiente o en la tierra húmeda, adquiere suficiente energía cinética debido a la radiación solar, y pasan del estado líquido al gaseoso.

Todo tipo de agua en la superficie terrestre está expuesto a la evaporación. El fenómeno será más intenso cuando mayor sea la cantidad de agua con posibilidad de evaporarse.

Durante la evaporación, el movimiento de las moléculas que han escapado de la superficie del agua produce una presión, la cual se denomina presión de vapor.

El calor absorbido por la unidad de masa de agua para el cambio de estado se llama calor latente de evaporación.

Uno de los factores que más influyen en la evaporación es la radiación solar, la cual actúa como fuente de energía para que se efectúe el proceso, ya que trae consigo un aumento de temperatura del agua, lo cual origina, que se incremente la velocidad de las moléculas del agua y disminuye la tensión superficial.

En resumen se puede decir que la evaporación es afectada por la radiación solar, la temperatura del aire, la presión de vapor, el viento y posiblemente la presión atmosférica.

1.2.1 Medición de la evaporación

La unidad generalmente empleada para evaluar la evaporación es el cm de altura de lámina de agua evaporada.

Los principales instrumentos para medir la evaporación son:

- a) Estanques de evaporación
- b) Evaporímetros de balanza

a) Estanques de evaporación

Son depósitos cilíndricos de chapa galvanizada con un diámetro de 120 cm y 25.4 cm de altura; instalado sobre un enrejado de madera a unos 15 cm del suelo. El recipiente se llena hasta un nivel arbitrario, el cual debe mantenerse en días sucesivos entre dos señales a 20 y 17.5 cm del fondo del recipiente. Para medir el nivel del agua se introduce en el recipiente un alindro de reposo que contiene un tornillo con vernier. La diferencia de niveles dará una medida de la evaporación.

~~b) El evaporímetro de balanza. Es un depósito de 250 cm² de sección y 35 mm de profundidad, lleno de agua e instalado en una balanza, en la que se hacen lecturas sucesivas para medir la pérdida de peso. Tiene la ventaja de poderse usar como evaporígrafo, para el registro continuo de la variación del fenómeno.~~

Fórmulas para calcular la evaporación

a) Ecuación de Thornthwaite-Holzman

$$E = \frac{210 (e_1 - e_2) (V_{w2} - V_{w1})}{(T - 459.4) T_n (h_2/h_1)^2}$$

Donde:

E = evaporación en cm/h

e_1, e_2 = presión de vapor en pulgadas de Hg, en la altura inferior h_1 y la altura superior h_2 , respectivamente, sobre la superficie del agua.

V_{W2}, V_{W1} = velocidad del viento a las alturas h_2 y h_1 , en km/h

b) Ecuaciones basadas en cambios de energía

Debido a que el movimiento de vértice es el principal mecanismo por el cual el vapor de agua es removido en la vecindad de la superficie que se evapora, existen numerosas expresiones que permiten determinar la evaporación, basándose en consideraciones de transporte de la masa de agua por cambios turbulentos.

1.2.2) Evaporación neta

Es la evaporación que se tiene en vaso de almacenamiento o en una laguna. La evaporación neta para una laguna está definida por la siguiente expresión:

$$E_n = C E_m - p$$

Lake Hefner

ah

$$E \text{ diaria} = (0.068 + 0.059 V_{13}) (e_s - e_a)$$

Lake Mead

$$E \text{ diaria} = 0.072 V_{30} (e_s - e_a) [1 - 0.03 (T_a - T_w)]$$

En las ecuaciones anteriores:

E diaria = espesor de evaporación (pulgadas/día)

- P_w = presión de vapor próximo al agua
 e_s = presión de vapor de saturación del aire cercana a la superficie del agua (pulgadas de mercurio)
 e_a = presión de vapor actual del aire (pulgadas de mercurio)
 V = velocidad del viento
 P_a = presión atmosférica (pulgadas de mercurio)
 V_{30} = velocidad del viento a 30 pies arriba de la superficie (millas/hora)
 V_{13} = velocidad del viento a 13' pies arriba de la superficie (millas/hora)
 T_a = promedio de la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)
 T_w = promedio de temperatura de la superficie del agua ($^{\circ}\text{C}$).

Fórmula de Mayer (S.M.D.)

$$E = c \left(1 + \frac{u}{16.09} \right) (e_s - e_d)$$

u = velocidad del viento a una elevación de 10 m (km/h)

c_1 = constante = 0.34 si es lago pequeño; 0.50 si es un recipiente

e_s = presión de vapor de saturación a la temperatura del agua, cm de mercurio

e_d = presión de vapor del aire basada en la temperatura media mensual del aire y en la humedad relativa en la cercanía de los depósitos pequeños.

II.1) Evapotranspiración

Al plantear un balance hidrológico de un área, el interés primordial radica en la determinación de las pérdidas de agua totales, estas pérdidas de agua totales, reciben el nombre de evapotranspiración, la cual agrupa la evaporación de superficies de agua, suelo, nieve, hielo y de cualquier otra superficie, más la transpiración.

La evapotranspiración también recibe el nombre de uso consuntivo, para el caso de demanda agrícola. La evapotranspiración potencial se puede considerar como un límite superior de la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración la cual se conoce con el nombre de evapotranspiración real.

II.1.1) Métodos para valuar la evapotranspiración

La unidad más utilizada para valuar la evapotranspiración es el mm de altura, la cual está referida siempre a un intervalo de tiempo determinado.

Considerando los más utilizados, podemos agrupar los métodos de determinación de la evapotranspiración de la siguiente manera:

a) Medidas directas:

Evapotranspirómetros

Lisímetros

Parcelas y cuencas experimentales

Perfiles de humedad del suelo.

f) Métodos empíricos

Fórmula de Thornthwaite

Fórmula de Blaney-Criddle

Fórmula de Lowry-Johnson

Fórmula de Turc

Se describirán enseguida las más utilizadas

Medidas directas: Lisímetros

Son utilizables para valuar la evapotranspiración ya sea para una cosecha individual determinada o bien vegetación natural, estos aparatos no son otra cosa que recipientes con fondo permeable o con un mecanismo para mantener una presión negativa en el fondo.

En la actualidad los lisímetros al igual que los evapotranspirómetros son los únicos aparatos usados para contrastar fórmulas empíricas.

El método del lisímetro puede aplicarse a un suelo cubierto con vegetación utilizando la siguiente fórmula:

$$E_{VTP} = A - G - \Delta R \quad (2.1)$$

E_{VTP} = aportaciones de agua-salidas de agua-incremento en la reserva de agua del suelo utilizable por las plantas (ΔR).

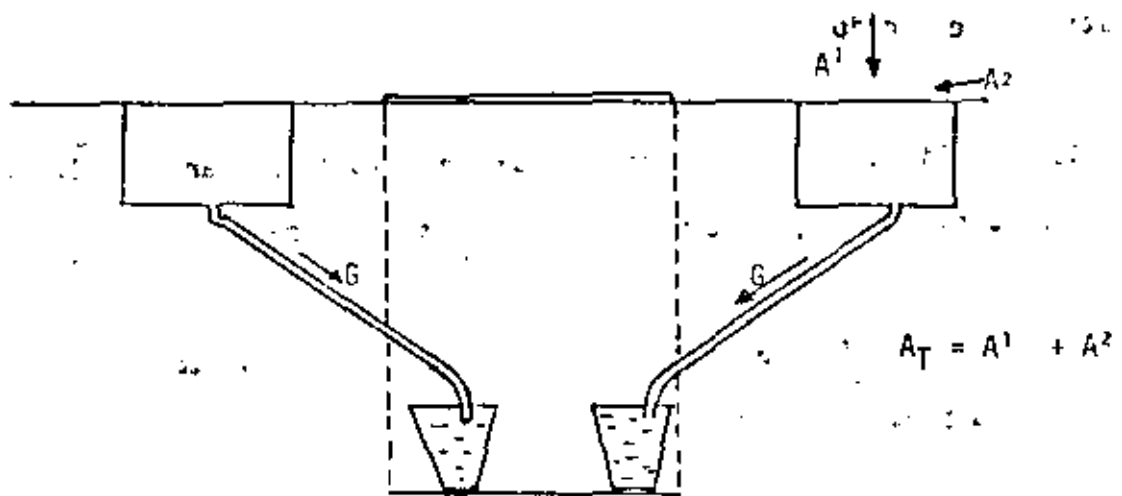
Esta ecuación se aplica en condiciones naturales. Variando R. Siendo de preferencia cortos los intervalos de medida.

El AR se obtiene mediante dos pesadas en una balanza de sensibilidad adecuada, el AR será la diferencia entre estas dos pesadas.

A y G se pueden determinar situando depósitos excavados en el terreno. Se coloca un tubo colector que recoge las salidas (G), el cual las conduce a un depósito colector también enterrado y situado a nivel inferior para medir las.

Las aportaciones (A) se miden con un pluviógrafo y conociendo la lámina de riego (A = altura de precipitación mas riego).

En la siguiente figura se muestra este depósito.



Conocidos AR y determinados A y G la ecuación 2.1 da el valor de la evapotranspiración buscado.

Parcelas y cuencas experimentales

A las parcelas experimentales se aplica la ecuación 2.1 en la que el término A se mide en la forma anteriormente explicada, ΔR se obtiene mediante tomas sistemáticas de muestras. G debe deducirse de las variaciones de niveles en sondeos situados en la parcela.

Para la determinación de G se deben tomar en cuenta los escurrimientos superficiales.

Perfiles de humedad del suelo

La hipótesis principal radica en que, se considera que en el intervalo de medida no hay aportaciones ni pérdidas de agua en la zona de estudio ($A=0$; $G=0$), quedando por tanto la ecuación 2.1

$$E_{VTR} = -\Delta R$$

Métodos empíricos

Fórmula de Thornthwaite

Thornthwaite utiliza la fórmula

$$E_{VTP} = K \cdot E$$

donde:

E_{VTP} = evapotranspiración potencial en mm/mes

$$K = \frac{N}{12} \frac{d}{30} d$$

N = número máximo de horas de sol, según la latitud. Tabla (2.1)

d = número de días del mes

E = evapotranspiración potencial en mm/mes

$$I = 16 (10t/I)^0$$

t = temperatura media diaria del mes en °C

a = coeficiente = $675 \times 10^{-9} I^4 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1972 \times 10^{-5} I + 0.49239$

I = índice de calor anual

i = $\sum i$

i = Índice de calor mensual = $(t/S)^{1.514}$

Fórmula de Blaney-Criddle

Blaney y Criddle propusieron la siguiente fórmula:

$$E_{VTP} = K_p \frac{45.7t + 813}{100}$$

donde:

E_{VTP} = evapotranspiración potencial en mm/mes

K = coeficiente empírico según tipo de vegetación (tabla 2.2)

t = temperatura media diaria del mes en °C

p = porcentaje de número máximo de horas de insolación en el mes, respecto al total anual (tabla 2.3)

o bien

$$E_{VTP} = 2.54 K \sum_{i=1}^n pt^i$$

E_{VTP} = evapotranspiración en n meses, en cm

K = coeficiente de uso consuntivo (tabla 2.4)

t = temperatura media mensual en °F

Fórmula de Lowry-Johnson

Lowry y Johnson propusieron la siguiente fórmula

$$E_{VTP} = 0.0018I + 24$$

donde:

E_{VTP} = Evapotranspiración en mm/año o cm/año

H = calor efectivo = grados acumulados de temperaturas diarias máximas sobre 32°F durante la estación de crecimiento del cultivo.

Fórmula de Turc

$$E_{VTP} = 0.40 \frac{t}{t + 15} (R_i + 50)$$

donde:

E_{VTP} = evapotranspiración potencial con mm/mes

t = temperatura media diaria del mes en °C

R_i = radiación global incidente media diaria del mes en cal/cm²/día.

Estimación de la evaporación real a partir de la evapotranspiración potencial.

La evapotranspiración potencial es un límite superior de la cantidad de agua que vuelve a la atmósfera.

La evapotranspiración real puede determinarse a partir de la fórmula siguiente:

$$P = E_{VTR} + Ex + \Delta R$$

donde:

P = precipitación en mm

E_{VT} = evapotranspiración real en mm

Ex = excedentes de agua (escurrimiento + infiltración en mm)

ΔR = incremento en la reserva utilizable por las plantas.

Explicando la condición

$$E_{YTR} \leq E_{VTP}$$

Lat. \ Mes	En	Fb	Mz	Ab	Mj	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
0°	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
5°	11,9	12,0	12,1	12,2	12,4	12,4	12,5	12,5	12,1	12,0	11,9	11,8
10°	11,6	11,8	12,1	12,5	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
15°	11,4	11,6	12,1	12,4	12,8	13,0	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
20°	11,1	11,4	12,0	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,5	11,7	11,2	10,9
25°	10,8	11,3	12,0	12,8	13,4	13,7	13,6	13,0	12,5	11,6	10,9	10,6
30°	10,5	11,1	12,0	12,9	13,7	14,1	13,9	13,2	12,4	11,5	10,7	10,2
35°	10,2	10,9	12,0	13,1	14,1	14,6	14,3	13,5	12,4	11,3	10,5	9,8
40°	9,7	10,6	12,0	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,5	11,2	10,0	9,4
45°	9,2	10,4	11,9	13,6	14,9	15,6	15,3	14,1	12,5	11,0	9,5	8,8
50°	8,6	10,1	11,9	13,8	15,5	16,3	15,9	14,5	12,6	10,8	9,1	8,1
55°	7,7	9,6	11,8	14,2	16,4	17,5	17,0	15,1	12,7	10,4	8,4	7,2
60°	6,8	9,1	11,8	14,6	17,2	18,7	18,0	15,6	12,7	10,1	7,6	6,3

TABLA 2.1 NUMERO MAXIMO DIARIO DE HORAS DE SOL SEGUN LATITUD NORTE
UNIDAD: HORAS/DIA

C u l t i v o	Periodo de crecimiento	K
alfalfa	entre heladas	0.60 - 0.65
algodón	7 meses	0.65 - 0.75
arroz	3 - 5 meses	1.00 - 1.20
cereales	3 meses	0.75 - 0.85
cítricos	7 meses	0.50 - 0.65
frijol	3 meses	0.60 - 0.70
lino	7 - 8 meses	0.80
maíz	4 meses	0.75 - 0.85
nuez	entre heladas	0.70
papa	3½ meses	0.65 - 0.75
pastos	entre heladas	0.75
remolacha	6 meses	0.65 - 0.75
sorgo	4 - 5 meses	0.70
tomate	4 meses	0.70
vegetales	3 meses	0.60

TABLA 2.3

PORCENTAJE P DE NUMERO MAXIMO DE HORAS-SOL

Latitud, en grados	m e s e s											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Norte												
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	12.31	10.70	8.57	6.98	5.04	4.00
50	5.98	6.30	8.24	9.24	10.68	10.91	10.99	10.00	8.46	7.45	6.10	5.65
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.03	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	6.67
35	7.05	6.83	8.35	8.83	9.76	9.77	9.39	9.37	8.35	7.87	6.97	6.86
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.19
25	7.53	7.14	8.39	8.61	9.33	9.23	9.45	9.09	8.32	8.09	7.40	7.40
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.95	8.30	8.13	7.63	7.63
15	7.94	7.36	8.43	8.44	8.98	8.80	9.05	8.83	8.28	8.26	7.75	7.66
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.50	8.85	8.71	8.25	8.24	7.81	8.10
0	8.50	7.66	8.48	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
Sur												
10	8.86	7.87	8.53	8.09	8.10	7.86	8.14	8.27	8.17	8.62	8.53	8.84
20	9.24	8.39	8.57	7.94	7.85	7.43	7.76	8.03	8.13	8.76	8.8	9.54
30	9.75	8.53	8.62	7.73	7.45	6.95	7.31	7.75	8.07	8.97	9.24	10.05
40	10.22	8.83	8.67	7.49	6.97	6.37	6.75	7.41	8.02	9.21	9.21	10.22

III.1 Métodos para la Estimación del Balance de Agua.

El balance de agua es útil para la planeación de obras hidráulicas, así como para la determinación de la recarga vertical en el almacenamiento subterráneo.

El balance de agua está basado en la ley de la conservación de la materia, la cual establece que para una región dada que tiene un volumen conocido, y dentro de un cierto período de tiempo en el cual se realiza el balance, la diferencia entre el total de entradas y el total de salidas debe ser igual al cambio de agua en el almacenamiento en ese volumen.

III.1.1 Balance Hidrometeorológico.

El balance es efectuado en base a elementos meteorológicos e hidrológicos, estudiando para esto el trayecto que sigue el agua desde su precipitación hasta su descarga.

De la precipitación sobre el terreno una parte es retenida por la superficie, otra escurre sobre ella y la restante penetra en el suelo.

La parte retenida por la superficie, conocida también como almacenamiento de intercepción el cual tiene un valor determinado de saturación antes de que el flujo penetre al suelo; este almacenamiento tiene generalmente un espesor no mayor de 4 cm que cuando es alcanzado tiene lugar el escurrimiento superficial e infiltración.

Ninguna percolación profunda ocurrirá hasta que no sea alcanzado un valor crítico de humedad del suelo, el cual es representado por la capacidad de campo del suelo.

La recarga al acuífero ocurrirá cuando la total humedad del suelo sea mayor que la capacidad del campo.

En la zona de saturación es donde se encuentra el agua subterránea, y como todos los intersticios están llenos, la porosidad es una medida directa del agua por unidad de volumen.

La ecuación para el balance hidrometeorológico, tomando como base el ciclo hidrológico, puede expresarse en la forma siguiente:

$$P = E_{VTR} + E_s + I$$

donde:

P = precipitación

E_{VTR} = evapotranspiración real

E_s = escurrimiento superficial

I = infiltración.

La cantidad de agua precipitada puede ser determinada usando ya sea el método de las isoyetas o el método de los Polígonos de Thiessen, para lo cual habrá que hacer un procesamiento de los datos pluviométricos existentes para la zona de estudio.

Es importante contar con una cantidad suficiente de pluviógrafos en la zona que cubran especialmente la zona con el fin de tener una idea de la intensidad de la lluvia.

El escurrimiento superficial se determinará en base a los hidrogramas del escurrimiento, obteniéndose de éstos, tanto el escurrimiento directo como el base, calculando al primero el escurrimiento superficial y al base el determinado

por las salidas de agua subterránea.

Para determinar el volumen infiltrado se puede hacer uso del criterio relacionado con los coeficientes de infiltración, obteniéndose resultados empíricos; este criterio consiste en determinar un índice de infiltración media (ϕ), el cual se define como la intensidad de lluvia media sobre la cual el volumen de lluvia es igual al del escurrimiento directo observado. Este método es aplicable a períodos de corta duración.

La evapotranspiración real puede calcularse por medio de la ecuación desarrollada por Turc, en función de la temperatura y la precipitación.

$$E_{VTR} = P / \sqrt{0.9 + (P/L)^2}$$

donde:

E_{VTR} = evapotranspiración real anual en mm

P = altura de la precipitación anual en mm

L = coeficiente dado por la expresión siguiente:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^2$$

T = temperatura media anual del área en °C

Una vez determinada la evapotranspiración real la infiltración estará expresada como sigue:

$$I = P - E_{VTR} - E_s$$

El volumen infiltrado no será la recarga total al acuífero ya que parte se empleará en satisfacer la deficiencia natural de humedad del suelo. Por lo que la recarga será un porcentaje de la infiltración.



centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS .
DE AGUA SUBTERRANEA

PRINCIPIOS DE HIDROLOGIA
SUPERFICIAL

Ing. Arturo Difurt Candelaria

julio, 1980

1. The first part of the document

2. The second part of the document

3. The third part of the document

4. The fourth part of the document

5. The fifth part of the document

PRINCIPIOS DE HIDROLOGIA SUPERFICIAL

V.1) Relación lluvia-escorrimento

Esta relación y los métodos para distribuir el escurrimento a través del tiempo, dan una base para una predicción útil de la operación de los proyectos hidráulicos, para la estimación de caudales de los ríos sin medida y para la extensión de registros de gastos en ríos con estaciones hidrométricas.

La relación lluvia-escorrimento puede agruparse de dos maneras:

- a) Relaciones con períodos grandes de tiempo (relaciones mensuales o anuales)
- b) Relaciones con períodos cortos de tiempo (relaciones horarias o diarias entre precipitación y escurrimento)

IV.1.1 Correlación entre precipitación y escurrimento

La cantidad de escurrimento a partir de una lluvia es dependiente de:

1. Las condiciones de humedad de la cuenca antes de la lluvia
2. De la cantidad de precipitación, además de la intensidad y duración de la tormenta.

Para las condiciones de humedad ninguna medida singular sirve para definir éstas. Gran parte de las investigaciones sobre relación lluvia escurrimento se han dirigido a encontrar un índice simple de las condiciones de humedad de la cuenca, este índice debe incluir la condición de humedad inicial.

El índice más usual es el índice de precipitación antecedente. Butter considera para correlaciones lluvia-escorrimento, el índice de precipitación antecedente igual a:

$$P_0 = aP_0 + bP_1 + cP_2$$

donde:

P_0 = precipitación anual en el año en estudio

P_1 = precipitación anual en el año anterior al estudio

P_2 = precipitación anual dos años antes del estudio.

a, b y c son llamados coeficientes de peso, cuya suma es igual a la unidad, los cuales son obtenidos por aproximaciones.

Para tormentas individuales se tiene:

$$P_{at} = P_{ao} K^t$$

donde:

P_{ao} = valor inicial del índice de precipitación antecedente

P_{at} = valor del índice de precipitación antecedente deducido 7 días más tarde.

K = factor de recesión que varía normalmente entre 0.85 y 0.98.

IV.1.2) Proceso de infiltración

El agua primero satisface la deficiencia de humedad del suelo y después el exceso pasa a formar parte del agua subterránea.

La cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo se llama capacidad de infiltración.

Todos los métodos disponibles para determinar la capacidad de infiltración de una cuenca están basados en la relación entre lo que llueve y lo que escurre, la cual

sólo es posible para cuencas pequeñas en donde ocurren tormentas sucesivas.

En la cuenca donde se requiere valorar la infiltración, se necesita, un pluviógrafo y una estación de aforos en su salida con lo cual se podrán hacer análisis horarios, si sólo se cuenta con estaciones pluviométricas el análisis será diario.

El criterio que se establece permite conocer la infiltración después de una tormenta, una vez que se ha determinado el escurrimiento directo.

$$P = Q + I$$

donde:

I = volumen de infiltración

Q = volumen de escurrimiento directo

P = volumen de precipitación.

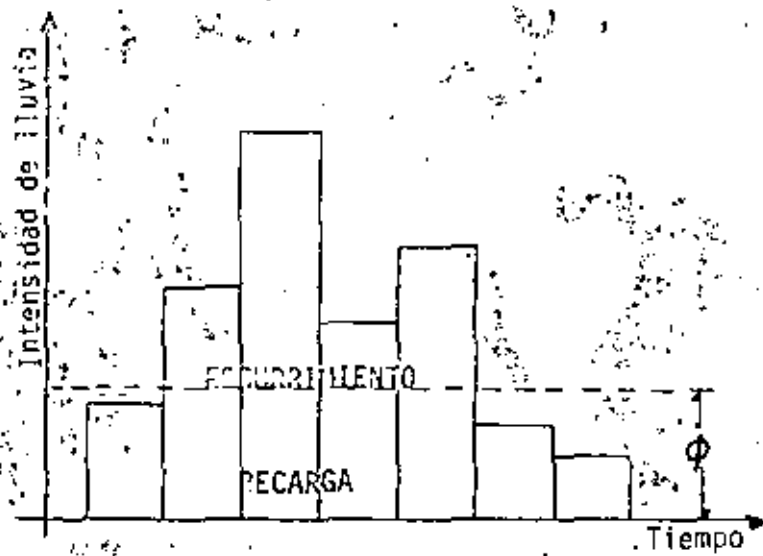
1.1.3) Índice de infiltración

El más simple es el índice (ϕ) definido como la tasa de precipitación por encima de la cual el volumen de lluvia es igual al volumen total de escurrimiento.

Así, si se conoce el histograma de la tormenta, el índice de infiltración media, ϕ , es la intensidad de lluvia media sobre la cual el volumen de lluvia es igual al del escurrimiento directo observado.

Para la obtención de ϕ se procede por tanteos, suponiéndose valores de ϕ y deduciendo la lluvia en exceso del histograma de la tormenta. Cuando esta lluvia

en exceso sea igual que la registrada por el hidrograma, se conocerá el valor de ...



IV.1.4) Hidrograma unitario

Es un hidrograma típico para la cuenca de estudio. Se llama hidrograma unitario puesto que, por conveniencia, el volumen de escurrimiento bajo el hidrograma se ajusta generalmente a 1 cm.

La teoría de hidrograma unitario está basada en la hipótesis siguiente:

La lluvia en exceso está distribuida uniformemente en toda su duración y sobre el área de la cuenca.

El tiempo base de duración del hidrograma del escurrimiento directo debido a una lluvia en exceso de duración unitaria constante.

Las ordenadas de los hidrogramas de escurrimientos directos de un tiempo base común son directamente proporcionales a la cantidad total de escurrimiento directo representado por cada hidrograma.

Deducción del hidrograma unitario

- a) Se separa del hidrograma de la tormenta el escurrimiento base y se calcula el escurrimiento directo

$$V_e = \sum Q_i \Delta T_i$$

donde:

$$Q_i = \frac{\text{gasto medio de escurrimiento directo para un intervalo de tiempo}}{\Delta T_i}$$

$$V_e = \text{volumen de escurrimiento directo}$$

- b) Se obtienen las ordenadas del hidrograma unitario, se dividen las ordenadas del escurrimiento directo entre V_e/A , donde A es el área que la cuenca.
- c) Para calcular la duración efectiva de la lluvia en exceso, que produjo el escurrimiento para el cual el hidrograma unitario es aplicable, de-

biéndose conocer el histograma de las precipitaciones medias de esa zona y el índice de infiltración (i).

IV.1.5) Hidrograma unitario sintético

Es útil para cuando se quiere analizar una cuenca sin datos hidrológicos y se cuenta con cuencas cercanas ya estudiadas.

a) Tiempo de retraso

$$t_p = C_1 C_T (L L_c)^n \quad (1)$$

donde:

C_1 = 0.75 en unidades del sistema métrico

C_T = constante igual a: 1.2 en zonas montañosas

0.72 en zonas al pie de montañas

0.35 en valles

L = longitud de la cuenca en km. Desde la estación dada hasta los límites del área de drenaje.

L_c = longitud desde la estación de aforo al centro de gravedad del área de drenaje.

n = constante igual a 0.30

b) Duración de la lluvia efectiva

$$\bar{t}_r = \frac{t_p}{5.5}$$

c) Descarga pico

$$q_p = \frac{C_2 C_p}{t_p} \dots \dots \dots (2)$$

q_p = descarga pico por unidad de área de drenaje en $m^3/s/lm^2$

C_2 = constante igual a 2.75 en unidades del sistema métrico

C_p = coeficiente que varía entre 0.56 y 0.69

La relación entre q_p y la descarga pico q_{pR} por unidad de área de drenaje es:

$$q_{pR} = \frac{q_p t_p}{t_{pR}} \dots \dots \dots (3)$$

T_{pR} = tiempo de retraso en horas (diferencia de tiempo entre el centroide de la lluvia efectiva y el pico del hidrograma unitario)

d) Tiempo base

$$T_b = 3 + \frac{t_{pR}}{8}$$

donde

T_b = tiempo base en días.

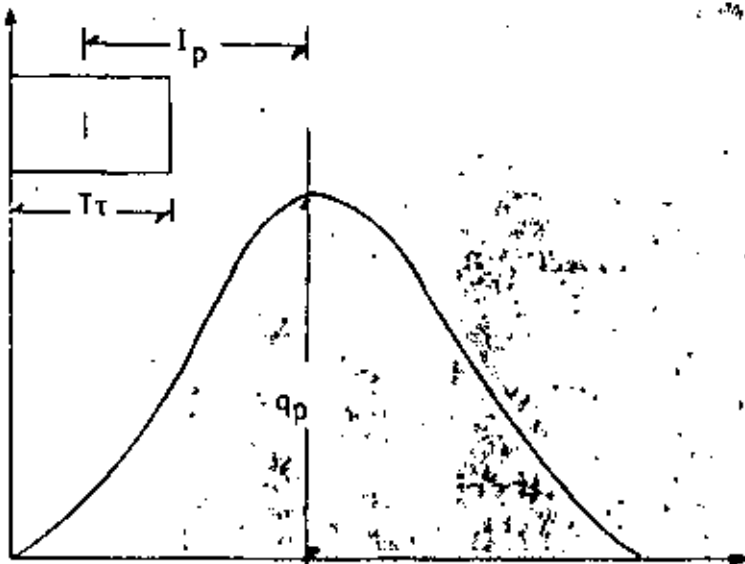
Si $t_{pR} = 5.5 t_R$; $t_R = t_r$; $T_{pR} = T_p$; $q_{pe} = q_p$

Si $t_{pR} \neq 5t_R$

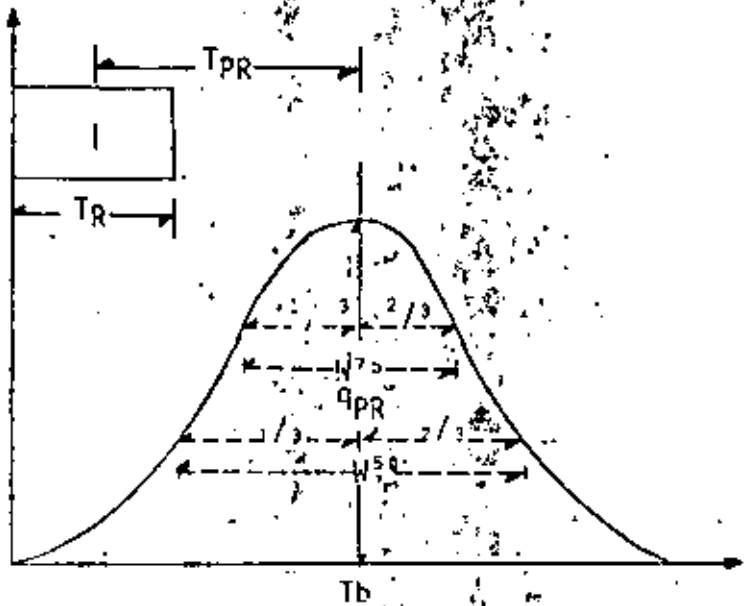
Entonces

$$t_r = t_R + 4(t_p - t_{pR})$$

$$t_p = 5.5 T_p$$



H.4. ESTANDAR



$$N = C_w q_{pR}^{-1.00}$$

$$C_w = 1.22 \text{ para } H_{75}$$

$$C_w = 2.14 \text{ para } H_{50}$$

V.1) Escurrimiento:

Es la parte de la precipitación drenada por las corrientes de las cuencas hasta su salida.

El escurrimiento puede ser

Superficial
Subsuperficial
Subterráneo

Superficial es el que proviene de la precipitación no infiltrada y que como su nombre lo indica escurre sobre la superficie del suelo y la red de drenaje hasta salir de la cuenca. La parte de la precipitación que constituye este escurrimiento recibe el nombre de precipitación en exceso.

El escurrimiento subsuperficial se debe a la precipitación infiltrada pero que se mueve lateralmente, debido en la mayoría de los casos a la presencia de un estrato impermeable paralelo a la superficie.

Escurrimiento subterráneo es el que proviene del agua subterránea, la cual es formada por la parte de la precipitación que se infiltra una vez que el suelo se encuentra saturado.

Las aguas formadoras de la corriente de un río pueden llegar a aquella por cualquier camino disponible desde que llegan a la tierra en forma de precipitación. Una porción es la constituida por el escurrimiento superficial.

La otra porción del agua se infiltra a través de la superficie del suelo y fluye paralela mente a esta hacia el río siendo esta parte la que contribuye a mantener el caudal del río durante los periodos de sequía. Para los estudios hidrológicos

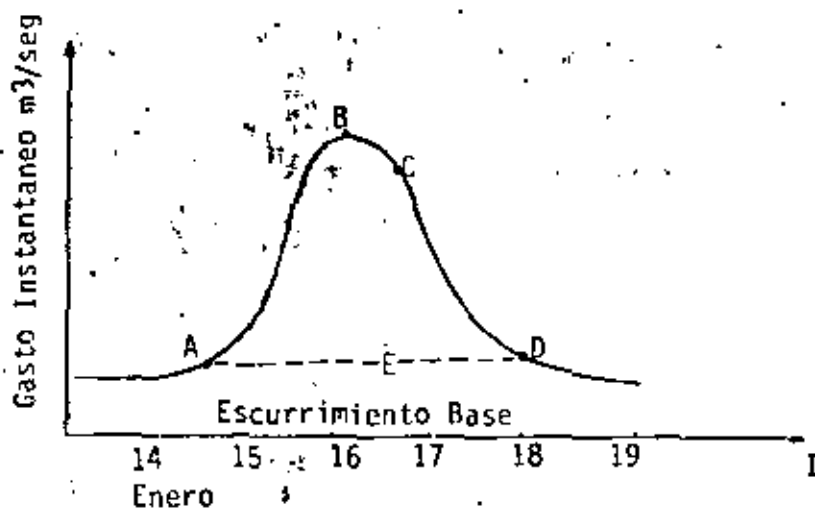
cuando interviene el caudal de un río, se hace necesario hacer una distinción entre estos escurrimientos. Siendo el primer paso para este estudio dividir los hidrogramas observados en sus componentes antes de analizar la relación entre precipitación y escurrimiento, determinando la forma de las características de un hidrograma para una cuenca.

10

V.1.1) Hidrograma de una Corriente.

Es la representación gráfica de las fluctuaciones del flujo, ordenadas cronológicamente. En esta gráfica se tienen el eje de las ordenadas, los gastos en $m^3/seg.$ y en el de las abscisas el tiempo en horas.

Representación de un hidrograma



En el punto A se inicia el escurrimiento directo producto de una tormenta, siendo B el punto donde se alcanza el gasto máximo. C representa el punto donde pasa el flujo por tierra llamándose punto de inflexión. En D finaliza el escurrimiento directo, continuando a partir de este el escurrimiento base.

V.1.2) Tiempos de concentración

Tiempo de concentración (T_c)

Es el tiempo que se toma el escurrimiento en viajar de la parte hidráulicamente mas distante del área de tormenta en la cuenca, a la salida o a otro punto de referencia aguas abajo.

Cuando se dispone de hidrogramas reales, el T_c se considera igual al tiempo que transcurre entre el final de la lluvia en exceso y el punto de inflexión. Pero cuando no se tengan hidrogramas, el T_c se podrá estimar a partir de fórmulas empíricas.

El tiempo de concentración está dado por la expresión siguiente:

$$T_c = T_0 + T_f$$

T_0 = Tiempo que transcurre la partícula de agua desde que cae hasta que llega a la corriente principal (tiempo de flujo)

T_f = Tiempo que transcurre de la llegada al río hasta la sección de aforo (tiempo de flujo en canal)



Fórmula de Izzard

Cuando el producto de la intensidad i (pulg/hora) y la longitud recorrida L_0 , sea menor de 500 el tiempo de flujo I_0 puede ser calculado por esta fórmula.

$$I_0 = 41(0.0007)i^{1/3} + \frac{K}{i^{2/3}} \left(\frac{L_0}{c^2 S}\right)^{1/3}$$

donde:

i = intensidad de lluvia en pulgadas/hora

L_0 = longitud desde el punto más lejano

S = pendiente del punto más lejano a la corriente principal

c = coeficiente de escurrimiento

k = constante adimensional (Tabla V-1)

Fórmula de Kerby

Es usada para valores de $L_0 < 360$ m (1 200 pies)

$$I_0 = C_k (NL_0 S^{0.5})^{0.467}$$

donde:

C_k = coeficiente igual a 0.83 para L_0 en pies e igual a 1.44 para L_0 en metros.

I_0 = tiempo de flujo en minutos

N = constante adimensional (Tabla V-2)

Fórmula de la onda cinemática

Basada en la solución de una simplificación aproximada de la onda cinemática de las ecuaciones de Saint Venant.

$$I_0 = C_w (n^2 L_0^2 / S)^{0.3} i^{-0.4}$$

En donde:

- C_w = coeficiente igual a 0.93 para i en pulg/hr, e igual a 6.9 para i en mm/hr.
 n = coeficiente de rugosidad de Manning. En la tabla V-3 se presentan algunos valores de n .

Fórmulas basadas en la velocidad de la onda de avenida:

$$T_c = L/V_w$$

donde

L = Longitud del cauce principal, en km

V_w = Velocidad de la onda de avenida, en km/h $V_w = 2(H/L)^{0.60}$

H = Desnivel total del cauce en km

T_c = Tiempo de concentración en horas.

De la figura V-4 se puede obtener el tiempo de concentración, teniendo como datos el área de la cuenca y la pendiente de ésta.

$$T_c = 32.5 (10^{-5}) (L^2/H)^{0.77}$$

Válida también sólo para cuencas no urbanas

T_c = tiempo de concentración en horas

L = longitud del cauce principal en metros

H = desnivel del cauce principal en metros

Fórmula de Rowe

$$T_c = \left(\frac{0.86 L^2}{H} \right)^{0.385}$$

T_c = tiempo de concentración, en horas

L = longitud del cauce principal, en km

H = desnivel total del cauce principal, en m

Fórmula de Forest Resources Division

$$T_c = \frac{L^{1.15}}{15 H^{0.38}}$$

T_c = tiempo de concentración en horas

L = longitud del cauce principal en km

H = desnivel total del cauce principal en m.

TABLA V-1 VALORES DE K PARA LA FORMULA DE IZZARD

SUPERFICIE	K
Pavimento o asfalto muy liso	0.0070
Alquitrán y pavimento arenoso	0.0075
Terracería	0.0082
Pavimento de concreto	0.012
Alquitrán y pavimento gravoso	0.017
Hierba densa	-0.046
Hierba normal	0.060

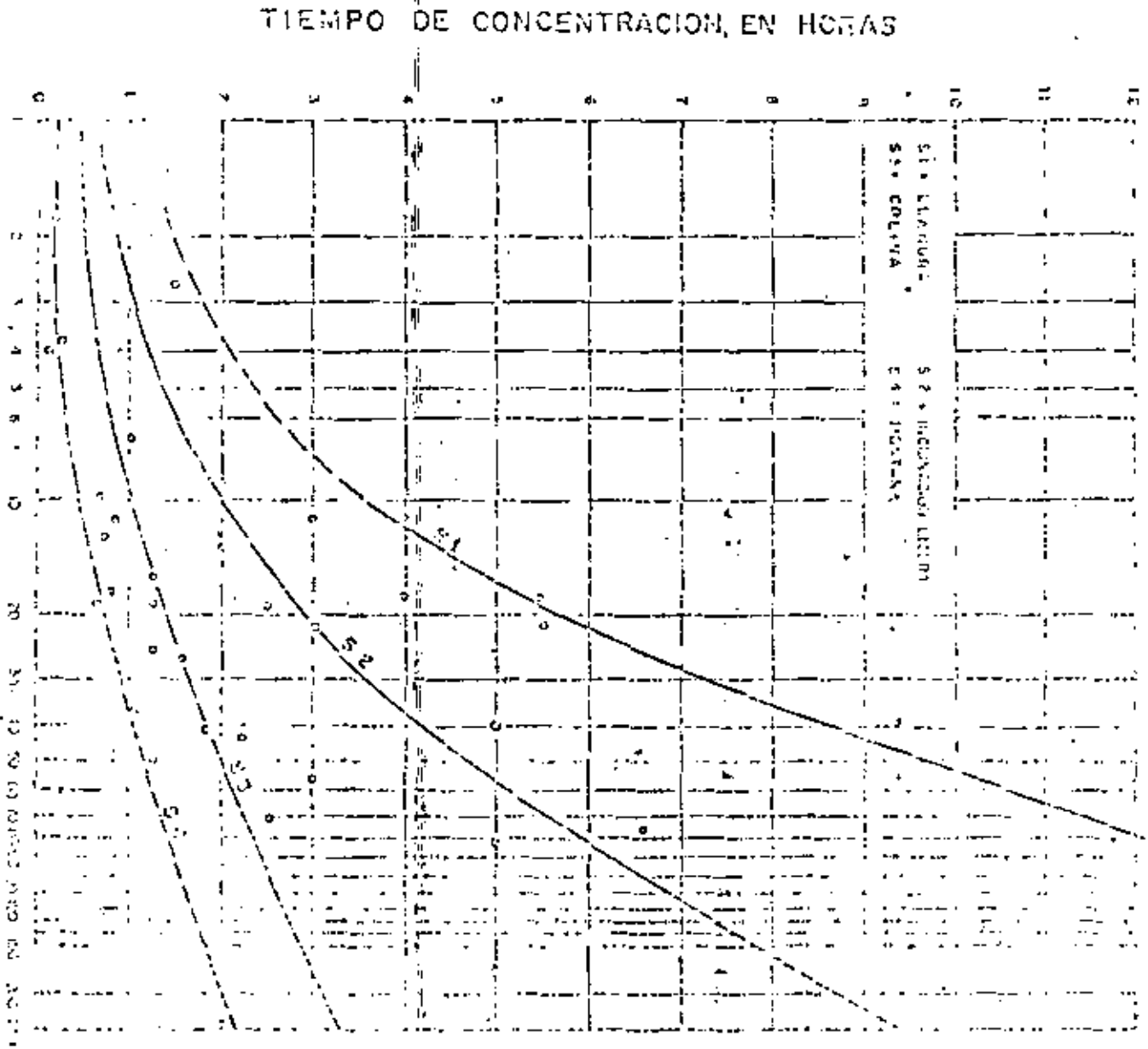
TABLA V-2 VALORES DE N PARA LA FORMULA DE KERBY

SUPERFICIE	N
Superficie lisa impermeable	0.02
Suelo liso descubierto	0.10
Suelo pobre en hierbas, cultivos en hileras o superficies descubiertas moderadamente lisas	0.20
Pastos o hierbas medias	0.40

TABLA V-3 VALORES DE n PARA LA FORMULA CINEMATICA

SUPERFICIE	n
Pavimento de asfalto	0.012
Pavimento de concreto	0.014
Suelos lisos	0.020
Superficies rugosas	0.03
Pasto ralo	0.03
Cultivos en hileras	0.04
Pastos no densos (pasturas)	0.04
Hierbas densas	0.06
Arbustos	0.08
Bosques	0.20
USO DE SUELO	n
Comercial	0.015 - 0.030
Semi-comercial	0.020 - 0.035
Residencial denso	0.025 - 0.040
Suburbano residencial	0.030 - 0.055
Parques	0.04 - 0.08

TABLA V.4 ESTIMACION DEL TIEMPO DE CONCENTRACION EN FUNCIÓN DE LA MAGNITUD Y TOPOGRAFIA DE LA CUENCA



VI.1. Período de retorno

Se ha introducido el concepto del intervalo de recurrencia o período de retorno como un sustituto de la probabilidad.

El período de retorno para un evento dado es definido como el período de tiempo dentro del cual este evento puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio.

Así por ejemplo en promedio un evento con un período de retorno de 2 años será igualado o excedido una vez en dos años.

La relación entre probabilidad y período de retorno está dado por:

$$T = \frac{1}{P(X > x)} = \frac{1}{1 - P(X \leq x)}$$

Por ejemplo, si la probabilidad que una avenida sea igual o excedida en un año es 0.1 $P(X > x) = 0.1$. El período de retorno o intervalo de recurrencia es

$$\frac{1}{P(X > x)} = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ años.}$$

La unidad de tiempo más común para período de retorno es el año, pero también puede ser mensual. La unidad de tiempo usada para formar las series de tiempo deberá ser la asignada al período de retorno.

Así por ejemplo para una serie anual se deberán tener períodos de retorno con unidades de año.

El objetivo del análisis de frecuencia es para datos hidrológicos convenientes para una distribución de probabilidad de modo que una relación entre la magnitud del evento y su probabilidad de excedencia puede ser establecida. El primer paso en el procedimiento es identificar la serie de datos (magnitud de evento). El orden para una conveniente distribución de probabilidad para la serie de datos estimada (o período de retorno equivalente) debe ser asignado para cada magnitud en la serie.

Considerando una serie de datos consistente de la población entera de una variable particular. Si esta serie fue ordenada por rangos en orden decreciente se podría establecer que la probabilidad de que la variable mayor sea igualada o excedida en $1/N$, donde N es el número total de variables. Igualmente la probabilidad de excedencia de la siguiente variable es $2/N$, y así sucesivamente. En general

$$P(X > x) = \frac{1}{T} = \frac{m}{N} \dots \dots \dots (6.1)$$

Donde, m = rango. En la práctica la población entera no es usada. Sin embargo, el razonamiento para llegar a la ecuación anterior es válido, excepto que el resultado es ahora sólo una estimación de la probabilidad de excedencia pasada en una muestra.

La ecuación es llamada una fórmula gráfica de Posición porque proporciona una estimación de probabilidad para lo cual la serie de tiempo puede ser graficada (magnitud contra probabilidad).

Las fórmulas gráficas de posición tienen características propias. Así la ecuación

ción 6.1 permite una probabilidad de excedencia de 1.0 para la variación más pequeña, implicando que todos los valores deben ser mayores. Debido a que solamente se usa una muestra es muy probable que en el futuro aparezca un valor menor. Sin embargo, si los valores menores de las series no son de mucho interés esta debilidad puede ser pasada por alto y por lo tanto la ecuación (6.1) es usada en el análisis de series de excedentes anuales.

Quizá la más popular fórmula gráfica posición para el análisis de series máximas anuales es:

$$P(X > x) = \frac{1}{T} = \frac{m}{N+1}$$

TABLA 6.1 LISTA DE VARIAS FORMULAS. GRAFICA POSICION

Año de Introducción	$T = \frac{1}{P(X>x)}$	Resultados para $N = 20$ $m = 1$ $m = 10$	
1923	$\frac{N}{m}$	20	2.0
1930	$\frac{2N}{2m-1}$	40	2.11
1939	$\frac{N+1}{m}$	21	2.10
1955	$\frac{N+0.4}{m-0.3}$	29.1	2.10
1958	$\frac{N+0.25}{m-0.375}$	24.5	2.10
1962	$\frac{3N+1}{3m-1}$	30.5	2.10
1963	$\frac{N+1-2a^*}{m-a}$	36.1	2.10

* a = función de N

N	a
10	0.448
20	0.443
30	0.442
40-100	0.440 ± 0.001

Para el estudio de las avenidas máximas Heras de los siguientes periodos de retorno

Tipo de avenida	Período de retorno en años
Máxima ordinaria	5 - 10
Máxima extraordinaria	100
Excepcional	500
Catastrófica	1 000

VII.1) CONCEPTOS BASICOS DE ESTADISTICA Y METODOLOGIAS ELEMENTALES DE APLICACION DE
VARIAS FUNCIONES DE DISTRIBUCION

ESTADISTICA

Es la rama de las matemáticas que se encarga de todo lo relativo a las reglas para coleccionar, presentar y procesar los datos observados u obtenidos al repetir varias veces un experimento.

Se distinguen en la estadística dos ramas, las cuales son:

- a) Estadística descriptiva: La cual trata todo lo relativo a la obtención, organización y presentación de los datos empíricos.
- b) Estadística matemática: La cual pretende obtener conclusiones acerca del caso general (población), del que sólo se dispone de unos datos (muestra).

La estadística matemática, compara al fenómeno estudiado con sus modelos probabilísticos teóricos, pretendiendo obtener una información que la Estadística Descriptiva no proporciona.

Experimento

Es el proceso de observación y registro

Datos:

Son los resultados que se obtienen al realizar varias veces un experimento.

Los datos o eventos pueden ser Aleatorios y Determinísticos, dependiendo si pueden ser previstos o no, la Estadística estudia los Aleatorios, los cuales a diferencia de los Determinísticos no pueden ser previstos.

Al total de datos se le conoce como población o universo, la cual en cuanto al número de datos se clasifica en:

- a) Finita o infinita, según el número de datos sea limitado o ilimitado.
- b) Real.- Si sus datos son concretos
- c) Hipotética.- Si se consideran todas las formas imaginables en que puede ocurrir el dato.

Muestra

Es un grupo de datos formados o extraídos de una población, siendo n el número de datos que se denomina tamaño de la muestra.

Desde el punto de vista estadístico un registro de datos hidrológicos es una muestra, extraída de una población determinada.

Los datos en cuanto a su ocurrencia se clasifican en:

- a) Datos históricos: tomados del fenómeno natural, su característica es que sólo pueden ser observados una vez y no ocurrir jamás.

Datos Experimentales: tomados de un experimento por lo cual se pueden obtener varias veces, con sólo realizar en igualdad de condiciones tal experimento.

En Hidrología superficial se trabaja comúnmente con datos históricos, definidos por una descripción numérica y los cuales se denominan variables Aleatorias.

Las variables aleatorias pueden ser:

- a) Variable aleatoria continua: cuando el número de valores que puede tomar es.

infinito, ejemplo: lluvia diaria

- b) Variable aleatoria discreta: cuando el número de valores que puede tomar es finito, ejemplo: el número de días con lluvia por mes (entero).

II.1.1) Conceptos de Probabilidad

Se entiende por Probabilidad a una función P que aplicada al evento A le asigna un número real $P(A)$, definido por

$$P(A) = \frac{\text{Número de casos favorables al evento } A}{\text{Número de casos posibles}} \dots \dots \dots (1)$$

Lo cual satisface los siguientes axiomas

$P(A) \geq 0$, para todo evento A es positiva su probabilidad y es cero si el evento es imposible

$P(E) = 1$, para todo suceso cierto E , definido éste como el que contiene todas las observaciones o eventos.

De donde se puede observar que la probabilidad de un fenómeno aleatorio cualquiera, es un número comprendido en el intervalo abierto de cero a uno.

Toda variable aleatoria (discreta o continua) se define completamente mediante su campo o rango de posibles valores y de su llamada: Ley de Probabilidades, la cual se puede expresar en su forma más común en la denominada: Función de Distribución de Probabilidades.

Quando se analiza una variable aleatoria discreta, sus datos se agrupan en intervalos de clase o categorías y se determina el número de eventos que pertenecen a cada una, llamándose Frecuencias de clase o Frecuencias absolutas.

El número de intervalos de clase conveniente a utilizar, depende del tamaño de la muestra, recomendándose:

$$K = 1 + 3.3 \log (n) \dots \dots \dots (2)$$

donde:

K = número de intervalos de clase a utilizar

n = número de datos de la muestra.

Si las frecuencias de clase se dividen entre el número total de datos de la muestra, se obtienen las llamadas: Frecuencias relativas de clase, que son números comprendidos entre cero y uno, es decir:

$$f_i = \frac{Z_i}{n} \dots \dots \dots (3)$$

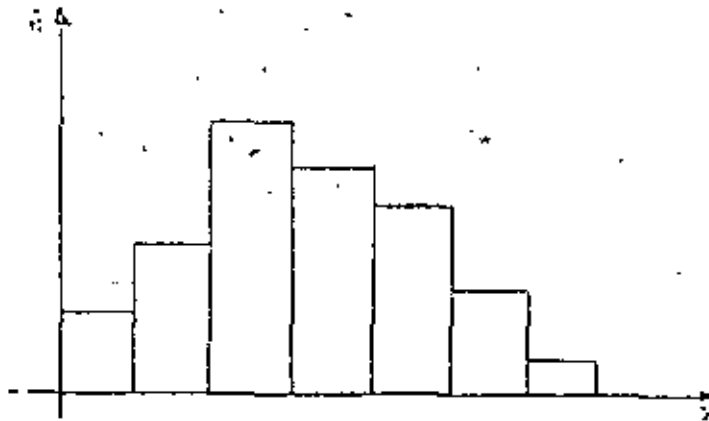
donde:

f_i = frecuencia relativa

Z_i = número de datos agrupados en el intervalo de clase

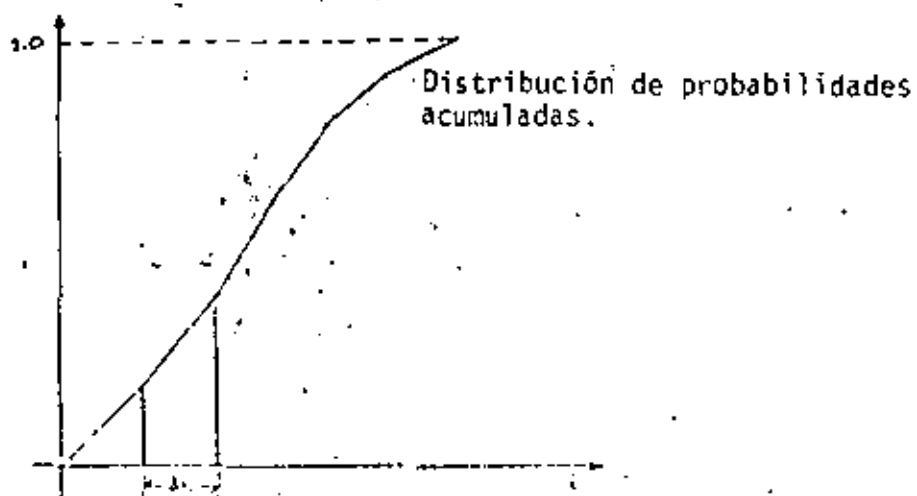
Ax_i = número total de datos

Una gráfica del tipo de barras, llamada: Histograma, en el que las áreas de los rectángulos se utilizan para representar las frecuencias relativas, corresponde a la forma gráfica de la distribución de probabilidades, la cual da una idea del rango de los datos, intervalo de clase con mayor frecuencia relativa, etc. Figura siguiente:



1.1.2) Distribución de Probabilidades Acumuladas

Se obtiene sumando las frecuencias relativas hasta el extremo derecho del intervalo de clase considerado. Si las sumas parciales se llevan como puntos de una gráfica en ordenadas y luego se unen por líneas rectas, se define una "curva" monótona creciente (función no decreciente) que va desde cero hasta uno, la cual recibe el nombre de Polígono de Frecuencias.



La distribución de probabilidades acumuladas, representa para cualquier punto la probabilidad de que la variable x tome un valor igual o menor a x y se designa por:

$P(X \leq x)$ Probabilidad de no excedencia; o

$1 - P(X \leq x) = P(X > x)$ Probabilidad de excedencia

1.3) Funciones de Distribución de una Variable Aleatoria Continua

De la ecuación (1) podemos observar que la probabilidad de que una variable aleatoria continua tome un valor dado cualquiera, es cero debido a que el denominador es infinito, debiéndose realizar un artificio para transformar la variable continua en discreta, este artificio consiste en dividir su campo o rango en un número infinito de tramos pequeñísimos (dx), de manera que se pueda considerar a la probabilidad media de que la variable aleatoria continua esté en alguno de tales intervalos o tramos.

En base a lo anterior, se define como Función de Densidad de Probabilidad ($f(x)$), el modelo matemático de la variable aleatoria continua, es decir, la curva límite del histograma cuando se tienen infinitos intervalos de clase y que posee las siguientes propiedades, las cuales satisfacen los tres axiomas de la probabilidad.

I) $f(x) > 0$

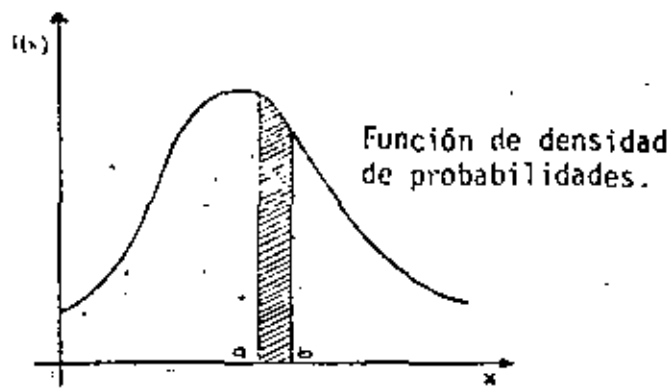
La curva (función de densidad) es positiva

II) $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$

El área comprendida por la curva (función de densidad) vale 1.

III) $\int_a^b f(x) dx = P(a \leq x \leq b)$ Siendo a y b valores cualquiera de x , de manera que

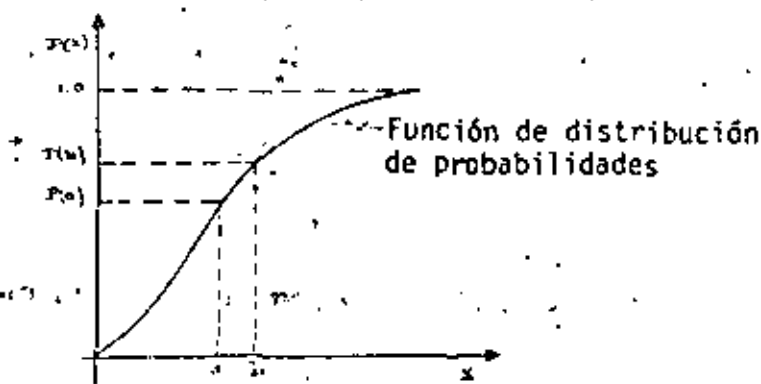
$a < b$



VII.1.4) Función de Distribución de Probabilidades Acumuladas

Se conoce también como función de distribución o distribución de probabilidades, se define como la probabilidad de que la variable tome valores menores o iguales que x , esto es:

$$P = F(x) = P(X < x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$



En la curva de función de distribución de la figura anterior, se deduce que la probabilidad de que la variable x esté comprendida entre los valores a y b ($b-a$) de la función de densidad de probabilidad, es igual a:

$$P(a < x < b) = P(b) - P(a)$$

Sustituyendo:

$$a = x \quad \text{y} \quad b = x + dx$$

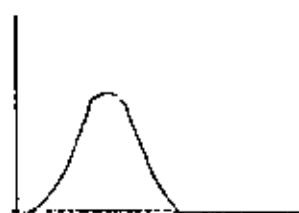
$$P(x < X < x+dx) = P(x+dx) - P(x) = f(x)dx$$

$$\therefore f(x)dx = dP(x)$$

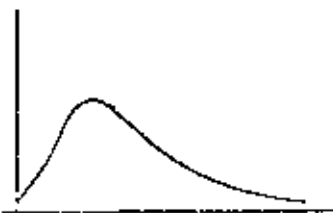
$$f(x) = \frac{dP(x)}{dx}$$

Lo cual implica que la función de densidad $f(x)$, es la derivada de la función de distribución $P(x)$.

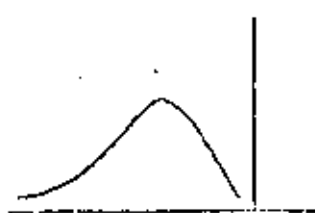
Se muestran enseguida, algunas de las formas posibles de la función de densidad:



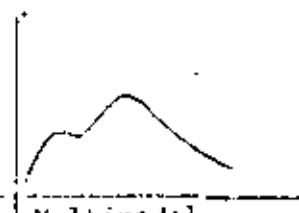
Acampanada



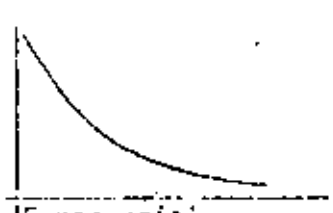
Asimétrica a la derecha.



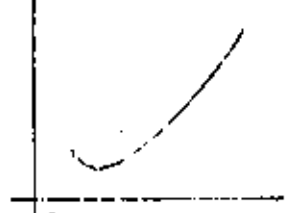
Asimétrica a la izquierda



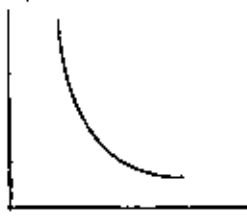
Multimodal



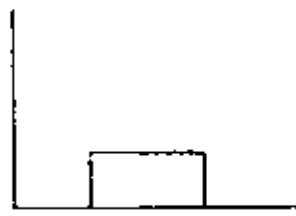
Exponencial



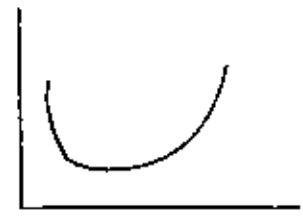
Forma U



FORMA "J" INVERSA



UNIFORME



FORMA U

11.1.5) Fórmulas de los principales parámetros estadísticos

Los principales parámetros estadísticos son:

Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \dots \dots \dots (4)$$

Siendo:

\bar{x} = média de la muestra

x_i = valor particular de la variable

n = número de datos de la muestra

La media permite conocer la tendencia central de una distribución estadística.

Varianza

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \dots \dots \dots (5)$$

donde:

S^2 = Estimación insesgada de la varianza poblacional.

Desviación Estándar

Es la raíz cuadrada de la varianza

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{n}{n-1} \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2} \dots \dots \dots (6)$$

Coefficiente de variación

Es la relación entre la desviación estándar y la media

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \dots \dots \dots (7)$$

Tercer momento central o coeficiente de asimetría absoluta:

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum (x_i - \mu)^3 \dots \dots \dots (8)$$

donde:

α = Tercer momento central de la población

μ = media poblacional

Un estimador insesgado de este parámetro a partir de la muestra es "a" y se calcula por:

$$a = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum (x_i - \bar{x})^3 \dots \dots \dots (9)$$

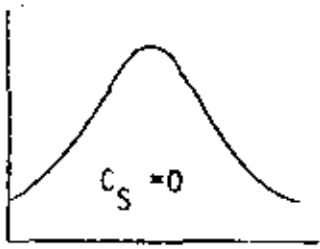
Coefficiente de asimetría relativo u oblicuidad

Es bastante usado en hidrología, debido a que la mayoría de las variables hidrológicas tienen distribuciones asimétricas.

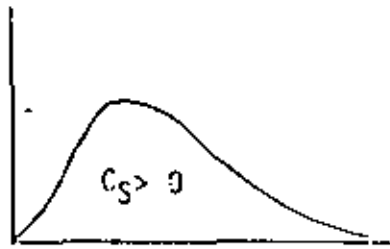
Está dado por la expresión siguiente:

$$C_s = \frac{\mu_3}{S^3} \dots \dots \dots (10)$$

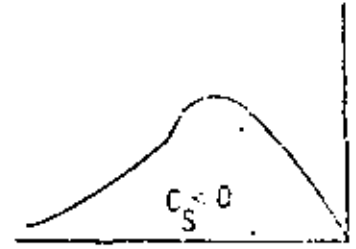
Dependiendo del coeficiente de asimetría relativa C_s , se tiene:



DISTRIBUCION SIMETRICA



DISTRIBUCION ASIMETRICA
POSITIVA



DISTRIBUCION ASIMETRICA
NEGATIVA

1.1. Funciones de Distribución de Probabilidades

1.1.1. Distribución de valores extremos tipo I o de Gumbel simple.

Para n valores extremos $(x_1; x_2, \dots, x_n)$ máximos o mínimos observados en n muestras de igual tamaño m , cuando n y m se aproximan al infinito, la probabilidad acumulada de que cualquiera de los extremos n , sea inferior a x , tiende a la expresión siguiente:

$$p(X \leq x) = e^{-e^{-Y}} \quad \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

x = variable cuyo campo es de $-\infty$ a $+\infty$

e = base de los logaritmos naturales

Y = variable reducida igual a $Y = c(x-a)$ $\dots \dots \dots (12)$

a = parámetro de escala o moda de la distribución

c = parámetro de forma

Despejando Y de la ecuación (11)

$$Y = -\text{Ln} \left\{ \text{Ln} p(X \leq x) \right\} \quad \dots \dots \dots (13)$$

A la distribución de probabilidades definida por la ecuación (11) se le conoce como Distribución Gumbel, debido a que Gumbel fue el primero en aplicarla al análisis de frecuencia de gastos máximos.

Para estimar los parámetros c y a , Gumbel propone utilizar las siguientes expresiones:

$$c = \frac{\sigma_N}{S} \dots \dots \dots (14)$$

$$a = \bar{X} - \frac{1}{c} (\bar{X}_N) \dots \dots \dots (15)$$

Donde:

σ_N y \bar{X}_N = Constantes teóricas solo función del tamaño n de la muestra dadas en la tabla 1

Introduciendo (11) y (15) en (12) y despejando X:

$$Y = \frac{\sigma_N}{S} \left(X - \bar{X} + \frac{\sigma_N}{S} (\bar{X}_N) \right)$$

$$X = \bar{X} + S \left(\frac{Y - \bar{X}_N}{\sigma_N} \right) \dots \dots \dots (16)$$

Toda variable X de una serie hidrológica puede ser expresada por:

$$X = \bar{X} + K(S) \dots \dots \dots (17)$$

ó

$$\frac{X}{\bar{X}} = 1 + K(C_V) \dots \dots \dots (18)$$

Donde:

X = variable aleatoria

K = factor de frecuencia, función del período de retorno y del tipo de probabilidad utilizada.

A la ecuación (17) se le denomina: Ecuación general para el análisis hidrológico de frecuencia y es aplicable a casi todas las distribuciones empleadas en hidrología.

La ecuación (16) es equivalente a la ecuación (18), tomando:

$$K = \frac{S - \bar{X}_N}{\sigma_N}$$

Metodología de aplicación de la distribución Gumbel

1. Se llevan a un papel de probabilidad Gumbel-Powell, los valores de la muestra, determinando la probabilidad de no excedencia y se deduce si tales datos tienen la tendencia a una línea recta, es decir, si la distribución Gumbel es adecuada.
2. Utilizando las fórmulas (4) y (5) se calculan los valores de la media (\bar{X}) y de la desviación estándar (S).
3. Se determinan σ_N y \bar{X}_N de la tabla 1 de acuerdo al tamaño n de la muestra.

VII.1.6.2) Distribución Log-Pearson tipo III

Es popular porque cuando su coeficiente de asimetría (g) vale cero, se obtiene una distribución log-normal, es decir la distribución Log-Pearson tipo III será una línea recta en el papel de probabilidad Log-Normal.

Esta distribución requiere del cálculo de tres parámetros que se estiman a partir de los logaritmos decimales de los datos, estos parámetros son:

$$\text{Log media} = \bar{\text{Log}}_x = \frac{\sum \text{Log}_x}{n} \dots \dots \dots (14)$$

$$\text{Log desviación típica } S_{\text{Log}_x} = \sqrt{\frac{\sum (\text{Log}_x - \bar{\text{Log}}_x)^2}{n-1}} \dots \dots \dots (20)$$

$$\text{Log coeficiente de asimetría: } g = \frac{n \sum (\text{Log}_x - \bar{\text{Log}}_x)^3}{(n-1)(n-2)(S_{\text{Log}_x})^3} \dots \dots \dots (21)$$

El valor de X para cualquier período de retorno se calcula a partir de la ecuación (17) modificada:

$$\text{Log}_x = \bar{\text{Log}}_x + (S_{\text{Log}_x})K \dots \dots \dots (22)$$

Dónde:

K = Factor de oblicuidad de la curva, cuyo valor está dado en la tabla 2, calculado en función del período de retorno y del valor del coeficiente de asimetría (g)

Metodología de aplicación de la distribución Log-pearson tipo III

1. Se calcula para cada dato de la serie su logaritmo decimal
2. Se calculan los parámetros de la distribución con las ecuaciones (20), (21) y (22)
3. De acuerdo al valor calculado para el coeficiente de asimetría se seleccionan los valores del factor de oblicuidad K de la tabla 2
4. Se llevan los valores de los parámetros de la distribución y cada valor de

K, a la ecuación (17) y se obtienen las magnitudes de x para los diferentes períodos de retorno analizados.

5. Se llevan al papel de probabilidad Log-normal, los datos y sus probabilidades y los valores de X para sus respectivos períodos de retorno, obteniéndose una línea ligeramente curvada.

VII.1.6.3) Distribución de frecuencias aplicadas a dos poblaciones

Es común en las estaciones, localizadas en zonas que son afectadas por los ciclones, la presencia en sus registros de datos procedentes de dos poblaciones diferentes, una debida a las condiciones reinantes en la región y otra debida a los ciclones. Lo cual se demuestra al llevar los datos de una muestra al papel Gumbel-Powel y descubrir que los puntos se ajustan a dos rectas de pendientes diferentes, la primera de menor pendiente originada por los datos no ciclónicos y la segunda de mayor inclinación generada por los eventos ciclónicos.

La ecuación general de la distribución es la siguiente:

$$P(X \leq x) = e^{-e^{-\frac{(x+a_1)}{c_1}}} \left[p + (1-p) e^{-e^{-\frac{(x+a_2)}{c_2}}} \right] \quad (23)$$

Donde:

- x = valor esperado (evento externo)
- e = base de los logaritmos naturales
- a_1 = parámetro de escala de la población no ciclónica
- c_1 = parámetro de forma de la población no ciclónica
- a_2 = parámetro de escala de la población ciclónica
- c_2 = parámetro de forma de la población ciclónica
- p = probabilidad de tener datos o eventos ciclónicos

Los cuales se evalúan a partir de las expresiones siguientes:

$$C_1 = 0.7797 S_1 \quad (24)$$

$$C_2 = 0.7797 S_2 \quad (25)$$

$$a_1 = 0.577 c_1 - \bar{x}_1 \quad (26)$$

$$a_2 = 0.577 c_2 - \bar{x}_2 \quad (27)$$

S_2 y S_1 son las desviaciones estándar de las poblaciones ciclónicas y no ciclónicas.

Metodología de aplicación

1. Se llevan los valores de la serie a un papel de probabilidad Gumbel-Powel y se determina si se tienen o no dos poblaciones.
2. Se calculan la media y la desviación estándar de cada población.
3. Se calculan los parámetros de la distribución con las ecuaciones (24) a (26).
4. Llevando los valores calculados en 3, a la ecuación (23) y dando un valor a x se calcula su correspondiente probabilidad de no excedencia y de ahí su período de retorno con la ecuación

TABLA 1. VALORES DE σ_N Y \bar{X}_N

N	σ_N	\bar{X}_N	N	σ_N	\bar{X}_N
8	0.9343	0.4843	40	1.1560	0.5481
9	0.9388	0.4852	50	1.1603	0.54854
10	0.9437	0.4852	51	1.1622	0.5489
11	0.9478	0.4853	52	1.1632	0.5493
12	0.9533	0.5035	53	1.1653	0.5497
13	0.9572	0.5070	54	1.1667	0.5501
14	1.0095	0.5100	55	1.1681	0.5504
15	1.02057	0.5123	56	1.1690	0.5508
16	1.0315	0.5157	57	1.1703	0.5511
17	1.0411	0.5161	58	1.1727	0.5515
18	1.0493	0.5202	59	1.1734	0.5518
19	1.0513	0.5220	60	1.17407	0.55203
20	1.05203	0.52355	62	1.1770	0.5527
21	1.0593	0.5252	64	1.1793	0.5533
22	1.0754	0.5266	66	1.1814	0.5538
23	1.0811	0.5283	68	1.1834	0.5543
24	1.0854	0.5293	70	1.18576	0.55477
25	1.09145	0.53083	72	1.1873	0.5552
26	1.0981	0.5320	74	1.1890	0.5557
27	1.1034	0.5332	76	1.1903	0.5561
28	1.1047	0.5343	78	1.1923	0.5565
29	1.1095	0.5353	80	1.19332	0.55682
30	1.11238	0.53622	82	1.1952	0.5572
31	1.1159	0.5371	84	1.1957	0.5576
32	1.1193	0.5380	85	1.1990	0.5580
33	1.1223	0.5388	86	1.1991	0.5583
34	1.1255	0.5393	88	1.20073	0.55883
35	1.12647	0.54034	92	1.2023	0.5593
36	1.1313	0.5410	94	1.2032	0.55952
37	1.1339	0.5413	96	1.2044	0.55983
38	1.1363	0.5424	98	1.2053	0.5603
39	1.1366	0.5430	100	1.20349	0.56002
40	1.14132	0.54332	120	1.20334	0.56351
41	1.1435	0.5442	200	1.20323	0.56715
42	1.1453	0.5443	250	1.20322	0.56878
43	1.1460	0.5453	300	1.20473	0.56933
44	1.1493	0.5453	400	1.20450	0.57144
45	1.15195	0.54530	500	1.20450	0.57379
46	1.1535	0.5453	700	1.20323	0.57377
47	1.1557	0.5473	1000	1.20321	0.57433
48	1.1574	0.5477			0.57472

VALORES DEL COEFICIENTE DE VOLATILIDAD K, EN LA DISTRIBUCION LOG-NORMAL TIPO III

Coe. de Volat. K	PERIODO DE RETORNO, EN AÑOS											
	1.01	1.02	1.03	1.25	2	3	10	25	50	100	200	
	Positive Skew											
2.0	-0.657	-0.625	-0.602	-0.635	-0.396	0.459	1.180	2.278	2.152	4.051	4.570	
2.9	-0.559	-0.535	-0.531	-0.651	-0.290	0.440	1.195	2.277	2.121	4.013	4.649	
2.8	-0.714	-0.711	-0.702	-0.605	-0.304	0.450	1.210	2.275	2.114	3.973	4.647	
2.7	-0.745	-0.736	-0.724	-0.651	-0.321	0.459	1.224	2.272	2.093	3.932	4.633	
2.6	-0.769	-0.762	-0.747	-0.690	-0.325	0.45	1.231	2.267	2.071	3.893	4.618	
2.5	-0.791	-0.779	-0.771	-0.711	-0.329	0.453	1.250	2.262	2.048	3.848	4.602	
2.4	-0.832	-0.819	-0.795	-0.721	-0.351	0.537	1.262	2.259	2.023	3.800	4.583	
2.3	-0.857	-0.845	-0.819	-0.739	-0.341	0.555	1.274	2.255	1.997	3.753	4.565	
2.2	-0.905	-0.892	-0.834	-0.782	-0.354	0.554	1.284	2.249	1.970	3.705	4.544	
2.1	-0.916	-0.914	-0.859	-0.785	-0.319	0.593	1.294	2.230	1.942	3.656	4.522	
2.0	-0.950	-0.939	-0.845	-0.777	-0.322	0.602	1.302	2.219	1.912	3.608	4.502	
1.9	-1.037	-0.983	-0.920	-0.755	-0.291	0.627	1.310	2.207	1.881	3.553	4.423	
1.8	-1.087	-1.020	-0.945	-0.799	-0.282	0.623	1.318	2.193	1.845	3.491	4.447	
1.7	-1.143	-1.056	-0.970	-0.808	-0.265	0.620	1.324	2.179	1.815	3.424	4.459	
1.6	-1.157	-1.093	-0.931	-0.817	-0.281	0.625	1.329	2.163	1.780	3.355	4.490	
1.5	-1.256	-1.131	-1.018	-0.825	-0.240	0.650	1.333	2.146	1.743	3.309	4.410	
1.4	-1.318	-1.168	-1.041	-0.827	-0.225	0.705	1.337	2.128	1.705	3.271	4.328	
1.3	-1.353	-1.206	-1.064	-0.838	-0.210	0.719	1.339	2.108	1.666	3.211	4.345	
1.2	-1.443	-1.243	-1.026	-0.834	-0.195	0.732	1.340	2.087	1.626	3.149	4.361	
1.1	-1.515	-1.280	-1.107	-0.845	-0.180	0.745	1.341	2.066	1.585	3.087	4.375	
1.0	-1.585	-1.317	-1.128	-0.852	-0.164	0.755	1.340	2.043	1.542	3.022	4.359	
.9	-1.650	-1.353	-1.147	-0.854	-0.145	0.769	1.339	2.018	1.498	2.957	4.301	
.8	-1.723	-1.388	-1.166	-0.856	-0.132	0.780	1.336	1.991	1.453	2.891	4.312	
.7	-1.806	-1.423	-1.183	-0.857	-0.116	0.792	1.333	1.967	1.407	2.824	4.223	
.6	-1.880	-1.458	-1.200	-0.857	-0.099	0.809	1.328	1.939	1.359	2.755	4.132	
.5	-1.955	-1.491	-1.216	-0.856	-0.083	0.803	1.323	1.910	1.311	2.686	4.041	
.4	-2.029	-1.524	-1.231	-0.855	-0.066	0.816	1.317	1.880	1.261	2.615	3.949	
.3	-2.104	-1.555	-1.245	-0.853	-0.050	0.824	1.309	1.849	1.211	2.544	3.856	
.2	-2.178	-1.586	-1.258	-0.850	-0.033	0.831	1.291	1.818	1.159	2.472	3.763	
.1	-2.252	-1.616	-1.270	-0.846	-0.017	0.835	1.292	1.785	1.107	2.400	3.670	
.0	-2.326	-1.645	-1.282	-0.842	0	0.842	1.292	1.751	1.054	2.326	3.576	
	Negative Skew											
-1	-2.450	-1.671	-1.292	-0.836	0.017	0.846	1.270	1.716	1.000	2.252	3.482	
-2	-2.472	-1.700	-1.301	-0.830	0.031	0.850	1.258	1.682	0.942	2.178	3.388	
-3	-2.541	-1.726	-1.309	-0.824	0.050	0.855	1.245	1.643	0.890	2.104	3.294	
-4	-2.615	-1.750	-1.317	-0.816	0.066	0.855	1.231	1.606	0.834	2.029	3.201	
-5	-2.686	-1.774	-1.323	-0.808	0.083	0.856	1.216	1.571	0.777	1.955	3.102	
-6	-2.755	-1.797	-1.328	-0.800	0.099	0.857	1.200	1.529	0.720	1.880	3.016	
-7	-2.824	-1.819	-1.333	-0.790	0.116	0.857	1.183	1.489	0.663	1.806	2.926	
-8	-2.891	-1.839	-1.336	-0.780	0.132	0.857	1.167	1.448	0.605	1.731	2.837	
-9	-2.957	-1.858	-1.339	-0.769	0.148	0.854	1.147	1.407	0.549	1.656	2.748	
-10	-3.022	-1.877	-1.340	-0.758	0.164	0.852	1.128	1.363	0.492	1.581	2.663	
-11	-3.087	-1.891	-1.341	-0.748	0.180	0.849	1.107	1.324	0.435	1.506	2.571	
-12	-3.149	-1.910	-1.340	-0.732	0.195	0.844	1.086	1.282	0.379	1.429	2.481	
-13	-3.211	-1.925	-1.339	-0.719	0.210	0.838	1.064	1.238	0.324	1.353	2.393	
-14	-3.271	-1.938	-1.337	-0.705	0.225	0.832	1.041	1.195	0.269	1.278	2.301	
-15	-3.330	-1.951	-1.333	-0.691	0.243	0.825	1.018	1.151	0.217	1.204	2.212	
-16	-3.388	-1.962	-1.328	-0.678	0.264	0.817	0.992	1.111	0.165	1.131	2.125	
-17	-3.444	-1.972	-1.324	-0.665	0.288	0.808	0.970	1.075	0.116	1.057	2.041	
-18	-3.491	-1.983	-1.318	-0.653	0.297	0.799	0.945	1.029	0.064	1.022	1.957	
-19	-3.533	-1.994	-1.310	-0.642	0.294	0.785	0.920	0.988	0.013	1.037	1.874	
-20	-3.576	-1.996	-1.302	-0.630	0.297	0.777	0.895	0.959	0.000	0.993	1.795	
-21	-3.620	-2.001	-1.294	-0.618	0.292	0.768	0.869	0.921	0.000	0.948	1.720	
-22	-3.665	-2.006	-1.284	-0.604	0.289	0.762	0.841	0.885	0.000	0.903	1.647	
-23	-3.710	-2.010	-1.274	-0.588	0.281	0.759	0.812	0.828	0.000	0.857	1.576	
-24	-3.754	-2.011	-1.262	-0.582	0.281	0.755	0.785	0.777	0.000	0.812	1.503	
-25	-3.798	-2.012	-1.250	-0.575	0.273	0.751	0.751	0.730	0.000	0.767	1.431	
-26	-3.842	-2.013	-1.236	-0.569	0.268	0.746	0.727	0.687	0.000	0.722	1.360	
-27	-3.887	-2.015	-1.224	-0.562	0.266	0.741	0.702	0.645	0.000	0.677	1.290	
-28	-3.931	-2.016	-1.210	-0.556	0.261	0.736	0.677	0.603	0.000	0.632	1.220	
-29	-3.975	-2.017	-1.198	-0.550	0.257	0.731	0.652	0.561	0.000	0.587	1.150	
-30	-4.019	-2.018	-1.184	-0.544	0.254	0.726	0.627	0.520	0.000	0.542	1.080	



centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS
DE AGUA SUBTERRANEA

TECNICAS DE MEDICION E INSTRUMENTACION

Ing. Arturo Difurt Candelaria

julio, 1980



Técnicas de Medición e Instrumentación

VIII.1) Piezómetros

Es un sondeo de diámetro suficiente como para medir su altura piezométrica. La condición fundamental que debe reunir un piezómetro es la de proporcionar medidas fiables del nivel piezométrico.

Instalación del piezómetro

Perforación

Para la perforación habrá que tener en cuenta que el diámetro de la perforación será función de:

- a) diámetro de la tubería a instalar
- b) profundidad del piezómetro

Normalmente, se suele aprovechar el sondeo de reconocimiento para dejarlo como piezómetro, para tener así un punto de observación de la variación interanual de niveles.

Tubería piezométrica

Se utiliza de naturaleza plástica y de acero comercializado, siendo más utilizadas las de plástico por su fácil manejo y por su economía.

La Tubería comercial metálica se emplea en casos en que se prevea que por fuertes desprendimientos en el taladro, no aguante la de plástico y principalmente cuando se trata de cementaria a la perforación dejando ranurada la zona de interés.

Las ranuras en tubería de plástico suelen disponerse, en el perímetro, alternadas con longitud de unos 4 a 5 cm y espesor de 2 a 3 mm.

Comprobación del funcionamiento del piezómetro

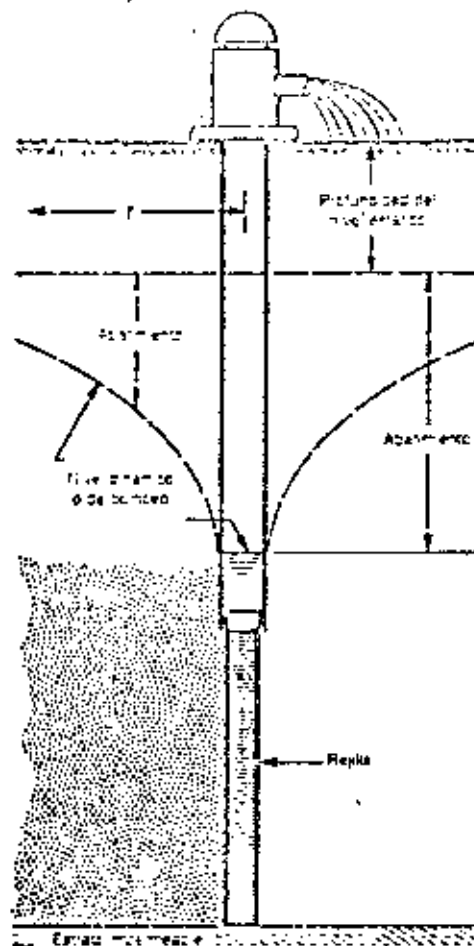
Para los taladros donde se ha instalado una sola tubería piezométrica que previamente se presupone se ha lavado con inyección de agua, para conocer si existe funcionamiento normal después de colocada la tubería.

Para esto se mide el nivel piezométrico inicial. A continuación durante unos minutos (20 a 30 dependiendo de la permeabilidad), se inyecta un caudal que oscila entre 50 a 200 l/min. Una vez finalizada la inyección, se procede a medir la recuperación del nivel primitivo. Si el piezómetro recupera su nivel original se dice que su funcionamiento es normal.

VIII.2) Pruebas de Bombeo

Una prueba de bombeo consiste en bombear de un pozo y registrar tanto el abatimiento en éste, como el producido por el bombeo en otros pozos de observación. Si la prueba se ha realizado adecuadamente, los datos que se obtengan pueden analizarse para determinar las características hidráulicas del acuífero.

Las mediciones que deben hacerse, incluyen los niveles estáticos antes de empezar el bombeo, la descarga de bombeo, niveles dinámicos durante varios intervalos de tiempo a lo largo de todo el periodo de bombeo, tiempo en que la bomba arranca, tiempo en que se haya observado cualquier cambio en la descarga, y tiempo en que se detuvo el bombeo.



MEDIDAS RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO DE LOS POZOS Y A
PRUEBAS DE BOMBEO EN ACUIFEROS Y POZOS

Objetivos a conseguir con las pruebas de bombeo.

1. Conocimiento óptimo del caudal a explotar
2. Determinar la transmisividad, coeficiente de almacenamiento, descensos que permitan conocer lo más exactamente las características puntuales del acuífero y sobre la construcción del pozo.
3. Régimen de explotación. El conocimiento de los parámetros anteriores nos podrá marcar la pauta estableciendo unos criterios racionales sobre la programación de los bombeos.

VIII.3) Medidas del caudal en ensayos de bombeo

Existen tres métodos frecuentemente utilizados: volumétrico, tubo de Pitot y vertedores. Utilizándose en algunos casos el moliente.

Método volumétrico

Consiste en controlar con un cronómetro el tiempo de llenado de un volumen conocido.

Se utiliza un recipiente de 220 lts, con lo que se puede utilizar para caudales de hasta 15 ó 20 lps. Pudiéndose emplear para caudales mayores utilizando recipientes acordes al caudal bombeo.

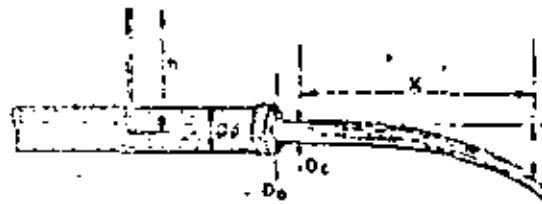
Las medidas suelen repetirse tres veces y obtener el valor medio como tiempo representativo.

Tubo de Pitot

Conociendo la sección de tubería y la carga piezométrica, podemos calcular primeramente la velocidad de circulación y a partir de esto el caudal

$$h = K \frac{v^2}{2g}$$

Sería suficiente disponer de unos obturadores finales situados al extremo de una tubería de conducción, diafragmas y de una boquilla u orificio conectado con el inferior de esta tubería, donde se aplicaría un tubo piezométrico - para medir la h



En la figura anterior:

h = altura media de un piezómetro

x = distancia horizontal que debe recorrer el chorro de agua para cualquier distancia específica de caída.

y = altura vertical

D_p = diámetro interior del tubo

D_o = diámetro de la abertura del diafragma

D_c = diámetro de la vena contraída.

El caudal se calcula relacionando el diámetro del orificio con la altura h del tubo piezométrico y un coeficiente C_d tabulado en cualquier manual.

Aforo por medio de vertedores

Los vertedores como ya vimos con anterioridad consisten en una barrera que

se establece en un canal, midiéndose la altura del nivel del agua aguas arriba de la retención, con relación al borde de la misma. Pudiéndose usar cualquiera de los vertedores vistos.

VIII.4) Mediciones del Nivel del Agua

Durante la ejecución de una prueba de bombeo, debe medirse repetidas veces la profundidad al agua. Las lecturas deben efectuarse a intervalos muy cortos - durante las primeras 2 horas de la prueba, aumentando el intervalo entre mediciones conforme la prueba avanza.

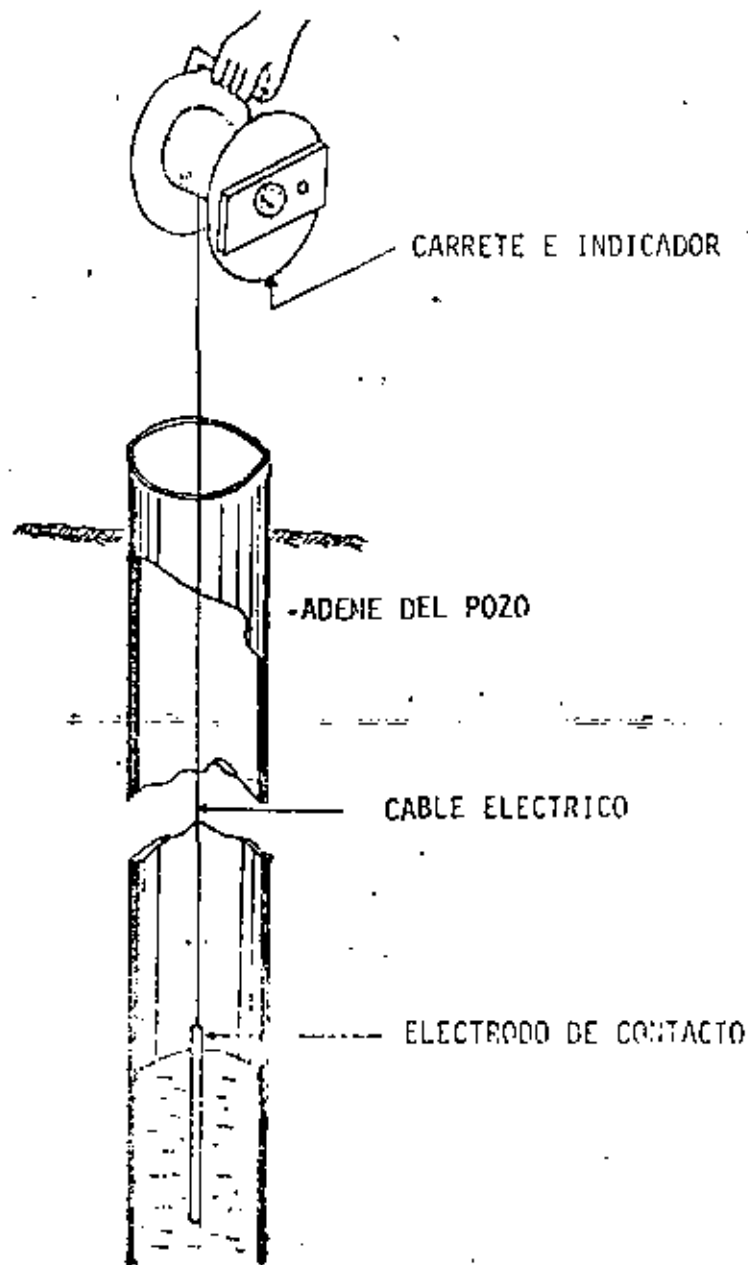
Las mediciones en el pozo de bombeo deben efectuarse cada 0.5 minutos durante los primeros 5 minutos contados a partir del inicio del bombeo; luego, cada 5 minutos durante una hora; después cada 20 minutos por 2 horas, y a partir de esto son suficientes lecturas tomadas cada hora.

Las mediciones de nivel en los pozos de observación deben tomarse cada 2 minutos desde el comienzo de la prueba y por espacio de una hora. En la siguiente hora, se harán lecturas cada 5 minutos; en las dos horas que siguen, cada 10 minutos y luego cada 20 minutos hasta concluir la prueba.

Sondas eléctricas

Es posiblemente el mecanismo más manuable que se pueda usar para medir profundidades, se le conoce también como medidor eléctrico de profundidades. Se suspende un electrodo de un par de alambres aislados, y un amperímetro indica que el circuito se ha cerrado y que la corriente circula al tocar el electrodo la superficie del agua.

- Para mejorar la exactitud de las lecturas de nivel, el electrodo y el cable se dejan suspendidos dentro del pozo durante el período de lecturas. Lo cual elimina la posibilidad de errores provenientes de dobleces del cable, lo que alteraría su longitud. El cambio sufrido por el nivel del agua se mide con una cinta metálica colocada paralela y a lo largo del cable.



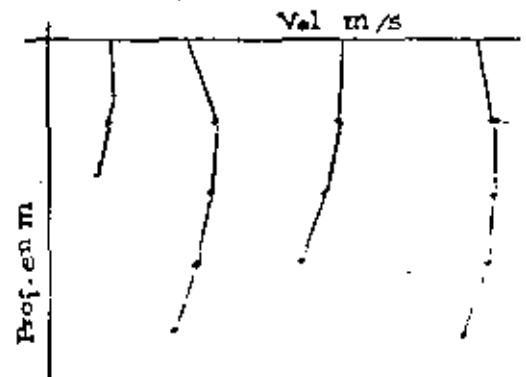
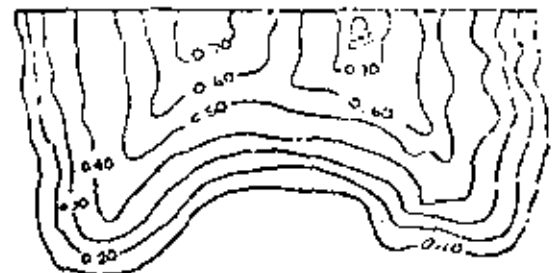
VIII.) AFOZO DE CORRIENTES

a) Generalidades.

Las velocidades en los canales abiertos son influidas por el rozamiento, viscosidad, tensión superficial y las irregularidades de la sección transversal, así como la alineación. En corrientes naturales, la distribución de velocidades es bastante irregular, ejemplo



Gráficas de variación vertical de la velocidad



Si a lo largo de una vertical se mide la velocidad a diferentes intervalos y posteriormente se grafica, tomando en el eje vertical las profundidades a partir de la superficie libre y en el eje horizontal las velocidades medidas, se obtienen las gráficas de velocidad, con las cuales se calcula la velocidad media igual al área entre la curva dividida entre la profundidad vertical analizada.

Han sido construidas un sinnúmero de estas curvas por el U.S. Weather Bureau y a partir del estudio de estas curvas, se han deducido las reglas siguientes:

1) La vel. máxima se presenta entre el 5 y el 25% de la profundidad aumentando el porcentaje con la profundidad del cauce. En cauces irregulares y poco profundos.

la velocidad máxima está cercana a la superficie libre.

2) La curva de variación vertical es una parábola cuyo vértice está en el punto de velocidad máxima.

3) La velocidad media en una vertical, dentro de un error máximo del 3% y un error medio del 1%, se presenta a 0.60 de la profundidad y aproximadamente es la media de las velocidades a 0.2 y 0.80 de la profundidad.

4) La velocidad media es de aproximadamente un 80 a 95% del valor que tiene en la superficie libre.

VIII.6) METODOS DE AFORO.

Debido a que existen variadas demandas de aforo en cuanto a precisión y volumen del aforo, se han ideado una gran variedad de Métodos para aforar o medir gastos.

FINALIDADES DE LOS AFOROS.

Entre las principales finalidades de los aforos se pueden enlistar las siguientes:

- 1) Determinar los coeficientes empíricos de las fórmulas hidráulicas.
- 2) Registros continuos de gasto en una corriente.
- 3) Determinación de las avenidas máximas.
- 4) Determinación del agua entregada para riego
- 5) Registros continuos de gasto en tuberías.
- 6) Cuantificación de desperdicios o fugas en sistemas de tuberías.
- 7) Determinación del gasto de pozos y manantiales
- 8) Pruebas de Bombeo
- 9) Pruebas de ruedas o turbinas hidráulicas

10) Determinación de la velocidad del agua.

CLASIFICACION DE LOS METODOS DE AFORO.

En general los métodos de aforo o medición se pueden clasificar en dos grupos que son:

1) Métodos de Área-Velocidad, midiendo la velocidad por:

- a) aforador
- b) Tubo de Pitot.
- c) Flotadores
- d) Método del color
- e) Método de la sal.

2) Métodos de Gasto Directo

- a) Gravimétrico
- b) Volumétrico.
- c) Con vertedores
- d) Con orificios, (de descargas directas y diafragmas).
- e) Dispositivos de aforo (Venturi, Parshall)
- f) Medidor Venturi.
- g) Aforo químico.

En general los métodos 1-a, 1-c, 2-c, 2-e, se emplean para medir gastos en tuberías y métodos 1-d y 2-g se usan indistintamente en canales y tuberías.

En los métodos de área-velocidad es necesaria la determinación, por medición real, de la velocidad media del agua. El gasto es el producto del área por la velocidad media. Los métodos de color y velocidad de la sal determinan la velocidad media por una sola observación. El aforador y el tubo de Pitot dan las vel. en el punto de observación y los flotadores en la trayectoria recorrida.

En los métodos de gasto directo la medición se hace por cuantificación del peso o volumen, para el método gravimétrico y el volumétrico respectivamente, de la cantidad de agua que fluye en un tiempo dado.

En la práctica se prefiere para el aforo de corrientes naturales los vertedores y el aforador.

b) ESTRUCTURAS VERTEADORAS AFORADORAS.

Cuando se pretende aforar un cauce natural en realidad lo que se pretende elaborar es una gráfica que relacione el gasto escúrrido con la elevación del agua en la corriente.

Si la corriente es pequeña (río pequeño o arroyo) se podrá instalar una estructura vertedora. Las estructuras vertedoras se pueden dividir en dos tipos de acuerdo a su magnitud, éstas son: vertedores de cresta viva y vertedores de perfil o cimacio.

Respecto a los primeros los más utilizados son los vertedores rectangulares de preferencia sin contracciones, los trapeciales generalmente el cipolletti y los triángulares para una abertura determinada.

VERTEDORES RECTANGULARES.

Las siguientes fórmulas de varios autores son las más utilizadas en EEUU y en Europa, están dadas para vertedores cuyas contracciones están suprimidas. Si hay contracciones laterales, la longitud efectiva de la cresta se obtiene por la fórmula siguiente:

$$L = L' - 0.10 H$$

en donde:

L = longitud efectiva de la cresta

L' = longitud real de la cresta

N = número de contracciones (0, 1 ó 2)

H = carga hidráulica, excluyendo la carga de velocidad de llegada.

FORMULAS:

FRANCIS (1852): $Q = 1.84 L [(H+h)^{3/2} - h^{3/2}]$

BAZIN (1888): $Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{3/2} \left(0.6075 + \frac{0.0045}{H} \right) \left(1 + 0.55 \frac{H^2}{d^2} \right)$

donde:

$$d = \frac{A}{L}$$

REH BOCK (1912): $Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{3/2} \left(0.605 + \frac{1}{1049 H - 3} + \frac{0.08H}{P} \right)$

KING (1918): $Q = 1.78 L H^{1.47} \left(1 + 0.56 \frac{H^2}{d^2} \right)$

SOCIEDAD SUIZA DE INGENIEROS Y ARQUITECTOS (1924)

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{3/2} \left(0.615 + \frac{0.615}{1000 H + 1.6} \right) \left(1 + 0.5 \frac{H^2}{d^2} \right)$$

SCHODER (1927)

$$Q = 1.84 L \left[\left(H + \frac{V_a^2}{2g} \right)^{3/2} + \frac{H}{1.84} \frac{V_b^2}{2g} \right]$$

en las fórmulas anteriores:

Q = gasto en m³/seg

L = longitud efectiva de cresta en m.

H = carga hidráulica incluyendo la carga de Vel de llegada

A = área hidráulica del canal de llegada, en m²

P = longitud de cresta en m.

Va = vel. media en el canal de acceso por encima de la cresta, en m/seg.

Vb = Vel. media en el canal de acceso por debajo del nivel de la cresta, en m/seg.

Notas:

- 1a. La carga hidráulica deberá de medirse por lo menos a 2.5 H aguas arriba del vertedor.
- 2a. Si se requiere exactitud en la medición, la carga hidráulica debe de ser el promedio de 10 y de preferencia 20 mediciones hechas a intervalos de 30 seg.

VERTEDORES TRIANGULARES.

Los vertedores triangulares o de escotadura en V permiten la medición de gastos mucho menores que los que pueden medir con exactitud en vertedores de cresta horizontal. La particularidad del vertedor triangular es que aumenta considerablemente a la carga aunque el gasto sea pequeño.

La fórmula básica para el gasto o derrame en un vertedor triangular en el cual se desperdicia la velocidad de llegada es la siguiente: $Q = c' \tan \frac{\theta}{2} H^{5/2}$



El valor de c' es el necesario para efectuar una corrección por pérdidas de energía.

y contracción del manto.

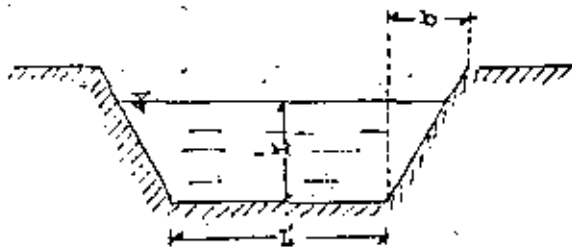
FORMULAS

De un sinnúmero de experimentos efectuados en la Universidad de Michigan para cargas que variaron de 6 a 54 cm en vertedores triangulares se obtuvieron las fórmulas siguientes de acuerdo al ángulo θ :

$$\begin{aligned} \theta = 45^\circ & \quad Q = 0.254 H^{2.43} \\ \theta = 60^\circ & \quad Q = 0.821 H^{2.51} \\ \theta = 90^\circ & \quad Q = 1.350 H^{2.47} \\ \theta = 120^\circ & \quad Q = 2.45 H^{2.48} \quad (\text{HERTZLER}) \end{aligned}$$

VERTEDORES TRAPECIALES

El derrame en un vertedor trapecial se considera igual a la suma de gastos en un vertedor rectangular y otro triangular.

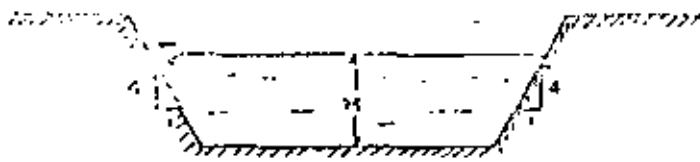


$$Q_t = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L' H^{2/3} + \frac{8}{15} \sqrt{2g} Z H^{5/2}$$

$$Z = \frac{b}{H} \quad Q_R = C_1 L' H^{3/2} + C_2 Z H^{5/2}$$

VERTEDOR CIPOLLETTI

El vertedor CIPOLLETTI es un vertedor trapecial cuyo talud es de 1:4, este talud o pendiente de los lados es aproximadamente el necesario para tener un gasto sobre el vertedor cipolletti igual al gasto de un vertedor rectangular sin contracciones laterales.



$$Q = 1.859 LH^{3/2}$$

Fórmula experimental de Cipoletti en la cual L es la longitud real de la cresta
 $L = L'$.

- El vertedor Cipoletti tiene gran empleo como aforador en irrigación. No debe de usarse para mediciones que requieren mucha precisión. No se dispone de ningún método para hacer corrección por velocidad de acceso.

VERTEDORES DE PERFIL O CIMACIO

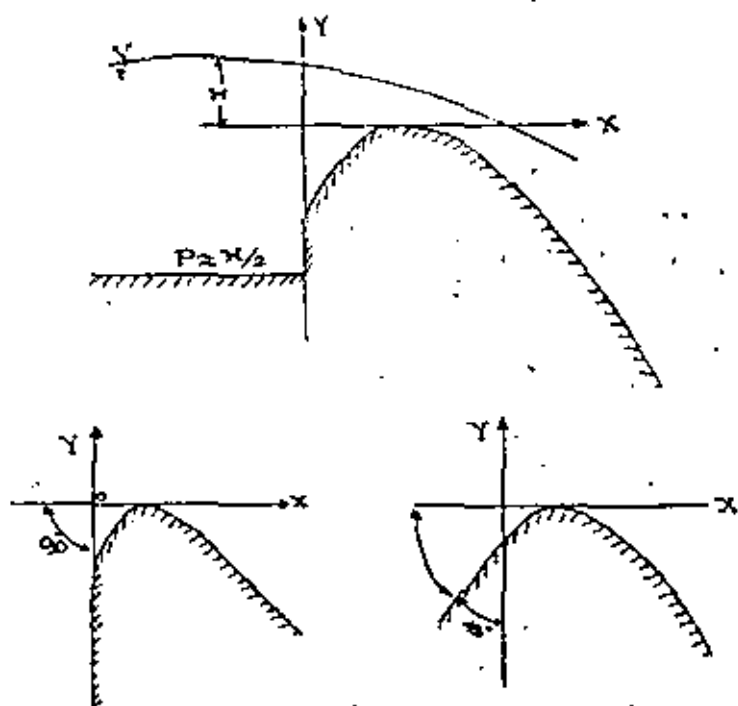
Forma de la Cresta. La gran mayoría de las formas de cresta son diseñadas de acuerdo a la trayectoria de la lámina vertiente, que es una parábola.

Desde 1886 a 1888 Bazin hizo las primeras investigaciones en láminas vertientes y diseñó un perfil el cual coincide con la parte inferior de la lámina, esta condición no produce presiones negativas en la cresta. La selección apropiada de un perfil involucra la ausencia de presiones negativas, máxima eficiencia hidráulica, estabilidad y economía.

A partir del perfil Bazin muchos otros perfiles han sido propuestos, por ejemplo:

- 1) PERFIL CREAGER, W.P. Creger a partir de los datos de Bazin y de experimentación formuló unas coordenadas unitarias para su perfil de vertedor, éstas se multiplican

por la descarga hidráulica que excluye la carga de velocidad de llegada, se grafica y se obtiene el perfil.



COORDENADAS UNITARIAS

X	Y	
	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 45^\circ$
0.0	0.126	0.000
0.1	0.036	0.010
0.2	0.007	0.060
0.3	0.000	0.005
0.4	0.007	0.023
0.5	0.060	0.090
0.6	0.142	0.189
0.8	0.257	0.321
1.0	0.397	0.480
1.2	0.565	0.665
1.4	0.870	0.992
1.7	1.220	1.377
2.0	1.960	2.140
2.5	2.820	3.060
3.0	3.820	4.080
4.0	4.930	5.240

2) PERFILES DE FORMULA

En base a datos experimentales del Bureau of Reclamation, el U.S. Army of Engineers (cuerpo de Ingenieros de la Armada) ha desarrollado varias formas de vertedores, - todas ellas expresadas por la fórmula siguiente:

$$x^n = K (Hd)^{n-1} y$$

donde:

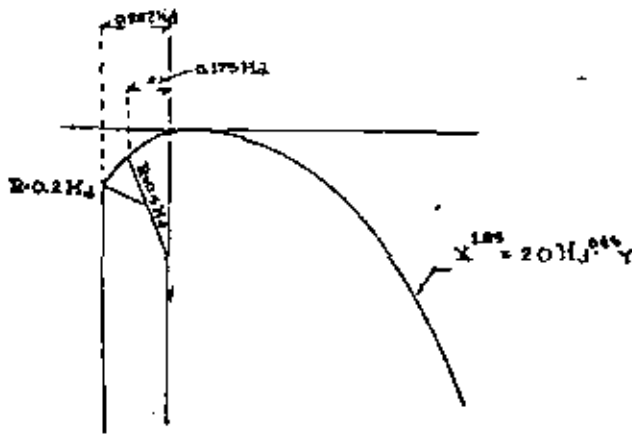
x y y = coordenadas del perfil de cresta con origen en el punto más alto del cimacio.

Hd = carga de diseño excluyendo la carga de velocidad de llegada.

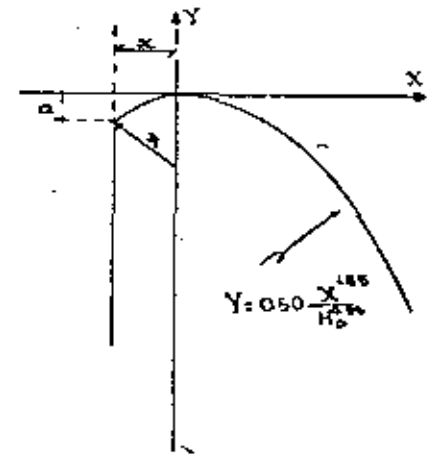
K y n = parámetros que dependen de la pendiente de la pared de aguas arriba del vertedor, dados en la tabla siguiente:

Pendientes de pared aguas arriba	K	n
Vertical	2.000	1.550
3:1	1.936	1.836
3:2	1.036	1.810
3:3	1.873	1.776

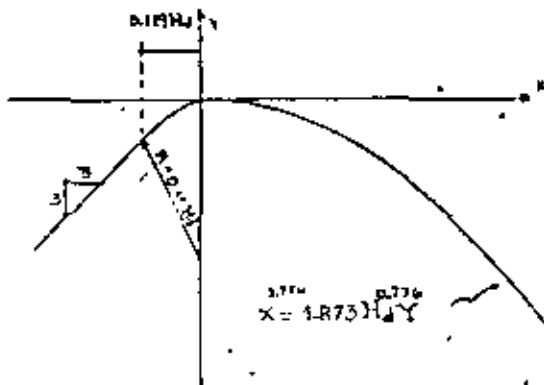
1) Perfil con parámetro vertical



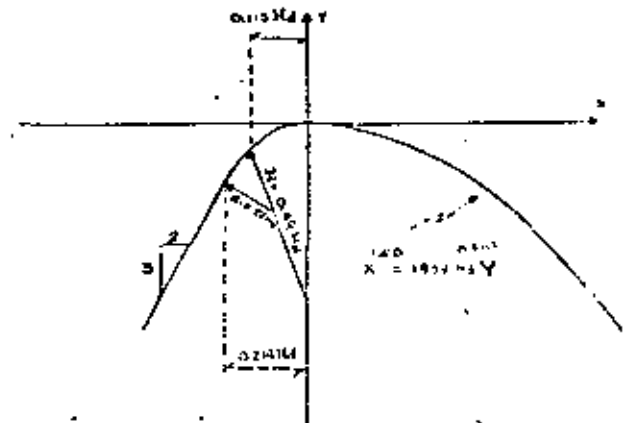
1.a) Perfil Scimemi

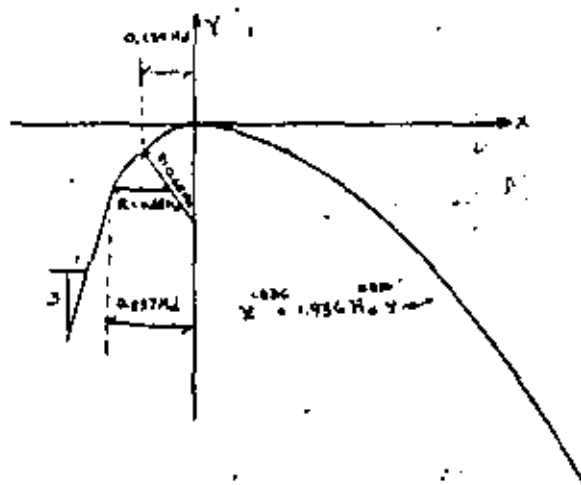


2) Paramento 3:3



3) Paramento 3:2



4) Paramento 3:5

GASTO DE DESCARGA SOBRE CIMACIOS

El gasto vertido sobre un cimacio está dado por la fórmula siguiente:

$$Q = C_o L \cdot H_d^{3/2}$$

donde:

Q = gasto en m^3/seg

C_o = coeficiente de descarga adimensional

L = Longitud de la cresta en m

H_d = carga de diseño excluyendo la carga de velocidad de llegada en m.

En pruebas o ensayos de modelos de cimacios se ha demostrado que el efecto de la velocidad de llegada es despreciable cuando la altura h del vertedor es mayor de $1.33 H_d$ ($h > 1.33 H_d$) para esta condición $C_v = 2.18$.

En cimacios bajos esto es ($h < 1.33 H_d$) la velocidad de llegada sí tiene efecto considerable y el coef. C_v tendrá un valor que se calcula por medio de la Fig. 1.

VELOCIDAD AL PIE DEL CIMACIO.

Debido a que existe una pérdida de energía para el flujo sobre el cimacio la velocidad actual o real es siempre menor que la teórica; la velocidad real depende de H_d (carga sobre el vertedor), Z (altura de caída), pendiente del cimacio y rugosidad de la superficie del mismo.

Con la Fig. 19 se puede obtener el coef. de corrección de la velocidad teórica para convertirla en velocidad real, dicha gráfica sólo es válida para cimacios cuya pendiente está comprendida entre 1:0.6 ó 0.8.

MÉTODO DE AFORO POR MEDIO DEL MOLINETE.

Para corrientes o ríos cuya magnitud ya es considerable el método que se adopta mejor es el método de área-velocidad midiendo la velocidad directamente por medio de un aforador (molinete).

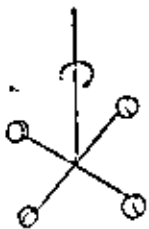
AFORADOR O MOLINETE.

El aforador o molinete consiste en síntesis en una rueda con una serie de aspas o bien cazolitas que son impelidos por la corriente, la rapidez de su rotación varía

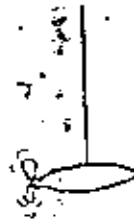
con la velocidad del agua; existe un sinnúmero de dispositivos para determinar la velocidad de la rueda, estos son: mecanismos contadores de revoluciones, mecanismos eléctricos adaptados a indicadores o registradores de las revoluciones y mecanismos acústicos indicadores de las revoluciones también por medio de sonidos para un número determinado.

TIPOS DE MOLINETES.

Existen dos tipos generales de aforadores el diferencial o de tipo cazoletas cuyo eje es vertical, en el cual las cazoletas giran por el exceso de presión en la parte cóncava con respecto a la convexa y el de tipo directo o de hélice, cuyo eje es horizontal, en el cual las aspas giran por acción directa de la corriente.



Cazoleta



UTILIZACION Y CARACTERISTICAS DE LOS MOLINETES.

El aforador se puede suspender de una varilla o de un cable, el primero se prefiere para corrientes pequeñas y el segundo para corrientes grandes.

CARACTERISTICAS.

La caract. que conviene que reúna un molinete, son:

- Debe de ser tan pequeño como sea posible de acuerdo a la corriente.
- El perfil debe de ser bien diseñado para evitar las llamadas corrientes parasitas.
- El rozamiento en la rueda debe de ser lo más pequeño y despreciable posible.

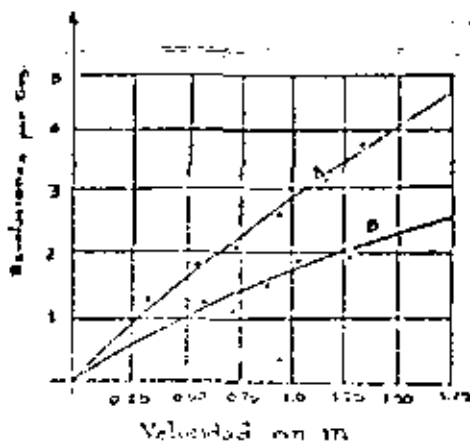
d) No deben de incluir en el aforador las corrientes verticales.

GRADUADO O CALIBRADO DEL AFORADOR (Tapado del Aforador)

Se puede establecer con bastante facilidad la relación que para un aforador existe entre el número de revoluciones y la velocidad del agua que está moviendo a dicho aforador, esto se logra cuando se tiene la velocidad conocida, en la cual se mueve el aforador o bien moviendo el aforador a velocidad constante en agua tranquila, ésta operación se le llama: graduado, calibrado o tratado del aforador.

El aforador o molinete se deberá de calibrar cuando se usa por primera vez y luego una vez al año de uso cuando menos, también después de algún accidente que sufra y se alteren sus partes.

Las observaciones de la graduación de un aforador dan velocidades en m/seg. en correspondencia con revoluciones por seg, estos valores se grafican y se obtiene lo que se llama gráfica de calibración o graduación del aforador.

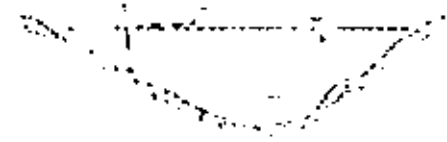


En esta gráfica la línea A es una graduación típica para un aforador de eje horizontal y la línea B es para uno de eje vertical (cazoletas). Las gráficas de calibración o graduación, en todos los aforadores son rectas con una irregularidad o discontinuidad cerca del extremo inferior.

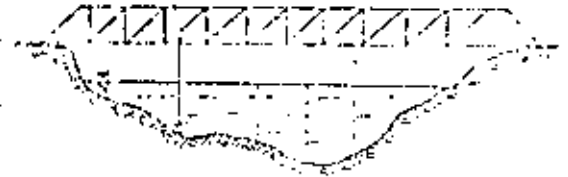
MEDICIONES CON AFORADOR O MOLINETE.

Las mediciones con un molinete se realizan según tres tipos de estructuras que se determinan de acuerdo a la naturaleza de la corriente:

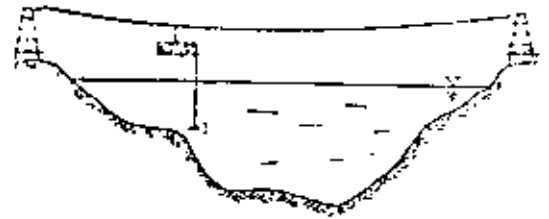
10. Por medio de un bote, en una corriente algo profunda pero pequeña y aislada.



20. Desde un puente existente, en corrientes profundas de magnitud considerable y cuya situación del puente favorezca la medición.



30. Carro o canastilla suspendida desde un cable de acero, estructura que se utiliza en corrientes de magnitud considerable pero aisladas.



Los puntos donde deberán efectuarse las mediciones se seleccionan en los cambios bruscos de velocidad o de perfil del fondo y cuando las condiciones de la corriente por aforar sean muy regulares las mediciones se acostumbra efectuarlas en puntos distanciados igualmente.

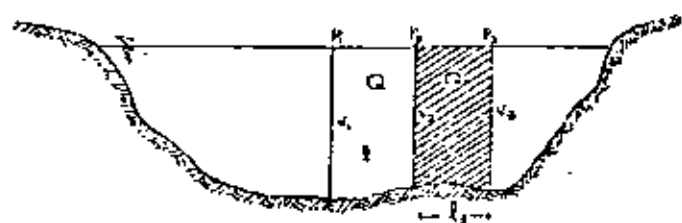
Para determinar la velocidad media en la sección analizada, se puede seguir cualquiera de los métodos siguientes:

- 1) Curva de variación vertical de la velocidad
- 2) Determinación de la velocidad a 0.60 de la profundidad (0.6 de la sup. hacia abajo)
- 3) Promedio de las velocidades a 0.2 y 0.8 de la profundidad.
- 4) Medición de la velocidad cerca de la superficie libre, a dicha vel. se le aplica un coef. de 0.85 para obtener la velocidad media.

b) Intercambios, es decir, moviendo el medidor lentamente a velocidad uniforme de la superficie libre hasta el fondo y volviendo nuevamente a la superficie, se toma el tiempo de la observación y el No. de rev. totales, para obtener unas revoluciones promedio por seg.

CALCULO DEL GASTO QUE PASA POR LA SECCION.

Si se denomina por P_1 y P_2 a las profundidades de agua en dos verticales adyacentes y V_1 y V_2 a sus vel. medias respectivas y por último a l la distancia entre las profundidades; el gasto que fluye o pasa entre las profundidades será:



$$Q = l \left[\frac{P_1 + P_2}{2} \right] \left[\frac{V_1 + V_2}{2} \right]$$

$$Q_1 = l_1 \left[\frac{P_2 + P_3}{2} \right] \left[\frac{V_2 + V_3}{2} \right]$$

como se puede deducir el gasto total Q_T será igual a la suma de todos los gastos de las franjas.

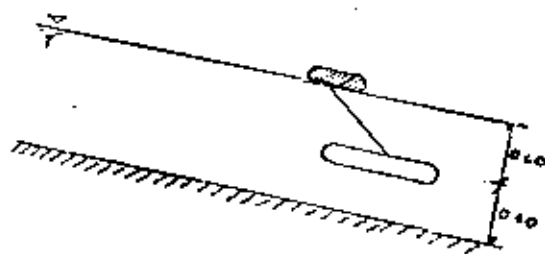
Para la corriente se elabora una gráfica de elev. contra gastos, por medio de la cual se conocerá el gasto con solo medir la elev. de la superficie libre, siempre y cuando no cambien las condiciones del cauce y sección se seguirá utilizando la gráfica formada. Cuando la condición cambie, se elaborará otra gráfica en base a nuevos aforos.

OTROS MÉTODOS DE ASEO.

Método de los flotadores.- Los flotadores son objetos flotantes cualesquiera, se emplean tres clases de flotadores: de superficie, de subsuperficie y de bastón o varilla.

Flotador de superficie.- Son objetos cuyo centro de gravedad es muy próximo a la superficie libre, la velocidad media con estos flotadores se obtiene multiplicando por 0.85 su vel. de recorrido medida.

Flotador de Subsuperficie.- Consiste en uno de superficie unido a otro sumergido por medio de un cable, el peso del sumergido es tal que mantenga tirante al cable sin bujir al de superficie. Como el flotador sumergido es bastante grande se puede despreciar el efecto del de superficie.



Para obtener la velocidad media con este flotador de subsuperficie, este debe de quedar sumergido a 0.60 de la profundidad o lo largo de la trayectoria seguida.

Estos flotadores se usan en corrientes de lagos, puertos y grandes masas de agua.

Flotadores de Bastón o Varilla.- Estos se construyen de palos de madera o tubos metálicos, en un extremo llevan un contrapeso, de tal manera que el extremo libre salga a la superficie, deben acercarse lo más posible al fondo pero sin tocarlo, se recomienda utilizarlos en cauces muy regulares o canales artificiales revestidos. Francis propuso la siguiente expresión:

$$V_m = V_r (1.012 - 0.116 \sqrt{\frac{D'}{D}})$$

V_m = Vel. media en la vertical en m/seg.

V_r = Vel media del flotador, en m/seg.

D = Profundidad

D' = Dist. de la parte inferior del flotador al lecho del canal.

La fórmula anterior da resultados precisos para valores de D'/D muy pequeños y no debe emplearse cuando $D' = 0,25D$.



OTROS MÉTODOS DE AFORO.

METODO DEL COLOR. Consiste en síntesis en inyectar una pequeña cantidad de solución concentrada de un potente colorante. Se determina el tiempo que tarda en propagarse el color hasta el punto de observación, se mide la long. del tramo y se calcula la velocidad media.

METODO DE LA SAL. Este método es una modificación al anterior, consiste en introducir sal al flujo la cual aumenta considerablemente la cap. de conducción eléctrica del agua. Se instalan electrodos y un amperímetro, se toman mediciones de tiempo para los instantes en que se inicia y termina la introducción de sal y la desviación de la aguja del amperímetro. El promedio de estos intervalos se considera como el tiempo de recorrido, por último se calcula la vel. media, conocida la distancia entre el punto de inyección y el amperímetro.

AFORO QUIMICO. Consiste en introducir al agua una cierta cantidad de sustancia química en un punto y aguas abajo lo más retirado posible se toma una muestra de agua. Si se representa por Q al gasto en $m^3/\text{seg.}$ se tendrá: si se introduce w Kg/seg de sustancia química y después se toma una muestra de l Kg de agua que contiene n Kg de sustancia química, se puede plantear la siguiente relación:

$$\frac{w}{1000} \cdot t = \frac{n}{l} \cdot 1000 \cdot l$$

La fórmula anterior da resultados precisos para valores de D'/D muy pequeños y no debe emplearse cuando $D' = 0,25D$.

con precisión.

EJEMPLO 1) En un canal rectangular de 2 metros de plantilla y 1.0 metro de tirante, se va a instalar un vertedor rectangular sin contracciones que permita aforar un gasto máximo de 150 lps sin provocar remanso en el canal, ¿cuál debe de ser la altura de la cresta?

Solución:

$$B = 2.0 \text{ m}$$

$$y = 1.0 \text{ m}$$

$$Q = 0.150 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$Z = ?$$

$$H = ?$$

$$Q = AV$$

$$A = 2.0 (1.0) = 2.0 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.150}{2.00} = 0.075 \text{ m/ség}$$

$$h = \frac{V^2}{2g} = \frac{(0.075)^2}{19.62} = 0.0002866 \text{ m}$$

$$Q = 1.84 B [(H+h)^{3/2} - h^{3/2}]$$

$$0.150 = 1.84 (2.0) [(H+0.0002866)^{3/2} - (0.0002866)^{3/2}]$$

$$\frac{0.150}{1.84 (2.0)} = 0.040 = (H+0.0002866)^{3/2} - 0.00000185$$

$$0.040 + 0.00000185 = (H+0.0002866)^{3/2} ; (0.04000185)^{2/3} = H+0.0002866$$

$$0.116 - 0.0002866 = H; H = 0.1157; H = 0.116 \text{ m}$$

$$2.45 - 1.10 = 0.116 + 0.814 \quad \approx 0.826 \text{ m}$$

【EJEMPLO 2】 En un canal rectangular de 4.0 metros de plantilla y 1.20 metros de tirante, se va a construir un vertedor rectangular con contracciones ácuales - deberán de ser su dimensión de la cresta y la altura de ésta, si un gasto máximo de 400 lps debe de pasar sobre el vertedor con una carga de sólo 25 cm.

Datos:

$$b = 4.0 \text{ m}$$

$$Y = 1.20 \text{ m}$$

$$Q = 0.4 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$H = 0.25 \text{ m}$$

$$b = ?$$

$$Z = ?$$

$$Q = AV$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.400}{4 (1.20)} = 0.0833 \text{ m}$$

$$h = \frac{V^2}{2g} = \frac{(0.0833)^2}{19.62} = 0.000354$$

$$Q = 1.84 (b-0.2H) \left[(H+h)^{3/2} - h^{3/2} \right]$$

$$0.40 = 1.84 \left[b-0.2(0.25) \right] \left[(0.254+0.000354)^{3/2} - (0.000354)^{3/2} \right]$$

$$0.40 = 1.84 (b-0.05) \left[(0.125) - 0.00000666 \right]$$

$$b = \frac{0.4 - 0.00000666}{(1.84) (0.125)} + 0.05 = 1.689 \text{ m}$$

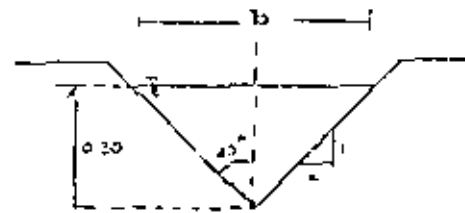
$$Z = Y - H = 1.20 - 0.25 = 0.95; \quad Z = 0.95 \text{ m}$$

EJEMPLO 3) Se requiere diseñar un vertedor triangular el cual uno de sus lados tiene una pendiente a 45° y el otro en talud y horizontal y uno vertical. ¿Que valor debe de tener x para un gasto de 80 lps pase con una carga de 30 cm? Se adopta un coeficiente de descarga de 0.60

$$Q = \frac{4}{15} C b 2g H^{3/2}$$

$$0.080 = \frac{4(0.60) 4.43}{15} (b) (0.30)^{3/2}$$

$$0.080 = 0.7088 b (0.1645)$$

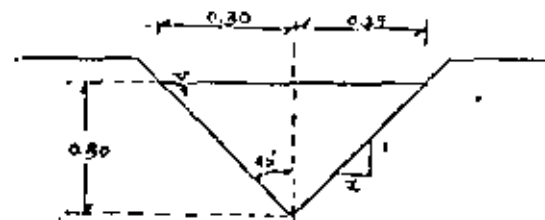


Sección final:

$$\frac{0.080}{0.7088 (0.1645)} = b \quad b = 0.686 \text{ m}$$

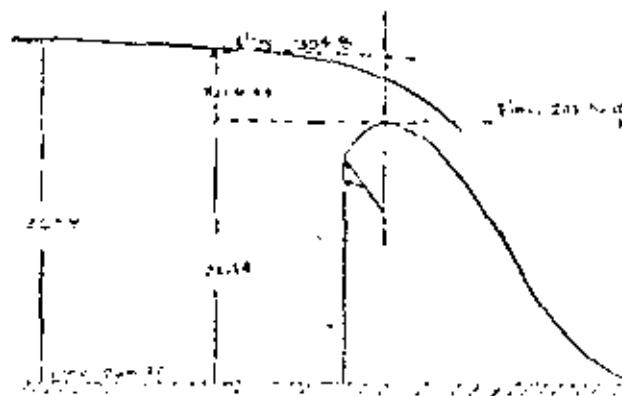
$$b = 0.30 + x = 0.686$$

$$x = 0.386; \quad x = 0.39 \text{ m}$$



EJEMPLO 4) Determinar la elevación de la cresta y la forma del cimacio vertedor que tiene su paramento aguas arriba vertical y una longitud de cresta de 7 a 2 m. El gasto de diseño es $2.123.76 \text{ m}^3/\text{seg}$. La elevación de la superficie de aguas arriba es de 304.8 m y el fondo del canal está a la elevación 268.22 m.

Solución:



considerando despreciable la velocidad de llegada se tiene:

$$Q = C_o L H_e^{3/2} \quad H_e = \frac{Q / s}{C_o L} = \frac{2.123.76 / s}{2.18 \times 76.2} = (12.785)^{2/3} = H_e = 5.47 \text{ m}$$

$$V_q = \frac{Q}{A} = \frac{2.123.76}{76.2(36.58)} = 0.762 \text{ m/seg}$$

$$H_a = \frac{V_q^2}{19.62} = \frac{(0.762)^2}{19.62} = 0.0293 \text{ m}$$

la carga de diseño será $H_d = H_e - H_a = 5.47 - 0.0296$

$$H_d = 5.44 \text{ m}$$

La altura del cimacio será: $h = 36.58 - 5.44 = 31.14 \text{ m}$

$$1.33 H_d = 1.33 (5.44) = 7.235 \text{ m}$$

al ser mayor h que $1.33 H_d$ la velocidad de llegada es despreciable como se supuso

$$\text{Elevación cresta} = 304.8 - 5.44 = 299.36 \text{ m}$$

$$R = 0.5 H_d = 0.5 (5.44) = 2.72 \text{ m}$$

$$y = 0.50 \frac{x^{1.65}}{(5.44)^{0.65}}$$

$$R = 0.2 H_d = 0.2 (5.44) = 1.088 \text{ m}$$

$$0.282 H_d = 0.282 (5.44) = 1.534 \text{ m}$$

$$0.175 H_d = 0.175 (5.44) = 0.952 \text{ m}$$

$$y = 0.1182 x^{1.65}$$

x	$x^{1.65}$	$y = 0.1182 x^{1.65}$
0.50	0.276	0.0326
1.00	1.33	0.1552
2.00	3.60	0.4255
3.00	7.26	0.8101
5.00	19.60	2.319
10.0	72.0	8.51
15.0	121.7	13.71
20.0	173.3	20.34

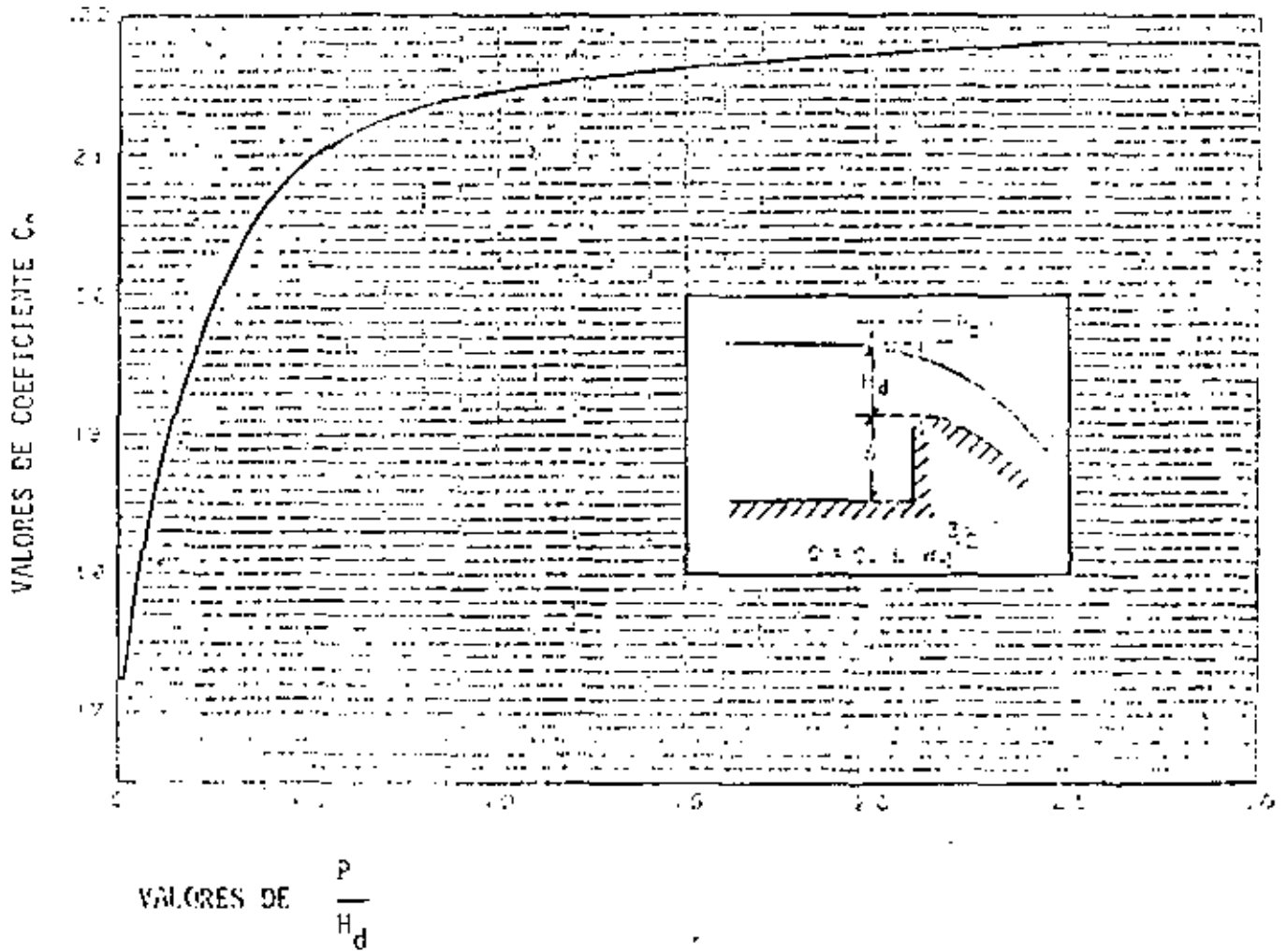


FIGURA 3. VALORES DE COEFICIENTE DE CORRIENTES EN CRESTAS DE CORVAJO CON PARAVIENTO VERTICAL

BIBLIOGRAFÍA

1. Linsley-Eubank-Paulus
Hidrología para Ingenieros
2. Comisión Federal de Electricidad
Manual de diseño de obras civiles
Sección A datos hidrológicos y geológicos
3. Ven te Chow
Handbook of Applied Hydrology
4. Rolando Springall Galindo
Hidrología
5. Pedro Martínez Leyva
Determinación de la recarga vertical de un acuífero a
través del balance de agua (Boletín de divulgación técnica SARH)
6. Daniel Francisco Campos Aranda
Manual para la estimación de avenidas máximas en cuencas y presas
pequeñas. Oficina de estudios especiales en hidrología, Dirección
Regional Noreste, SARH.
7. Rolando Springall Galindo
Capítulo 8, Hidrología
8. Johnson Division
El Agua Subterránea y los Pozos.





centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS

DE AGUA SUBTERRANEA

LOS ISOTOPOS AMBIENTALES Y LA

GEOHIDROLOGIA

Fis. José Luis Quijano León

julio, 1980.



LOS ISOTOPOS AMBIENTALES Y LA GEOHIDROLOGIA

Por: Fis. José Luis Quijano León*

1. INTRODUCCION

- 1.1 Qué es un isótopo
- 1.2 Isótopos estables e isótopos radiactivos
- 1.3 Isótopos ambientales y radioisótopos artificiales

TRAZADO NATURAL Y TRAZADO ARTIFICIAL

2. EL CICLO DEL AGUA Y LOS ISOTOPOS AMBIENTALES

- 2.1 Principales isótopos ambientales de interés en el ciclo del agua
- 2.2 Los isótopos estables y el fraccionamiento isotópico. Los procesos de evaporación y condensación
- 2.3 La línea meteórica y la línea de evaporación
- 2.4 Relación entre contenido isotópico y altura de la precipitación
- 2.5 Relación entre salinidad y contenido isotópico
- 2.6 Los isótopos radiactivos y el decaimiento. El concepto de reloj ambiental.

3. PROBLEMAS GEOHIDROLOGICOS QUE PUEDEN SER RESUELTOS CON LA AYUDA DE LOS ISOTOPOS AMBIENTALES. EJEMPLOS CONCRETOS

* Subdirección de Investigación y Tecnología de Apoyo, SARH.

LOS ISOTOPOS AMBIENTALES Y LA GEOHIDROLOGIA

Por: Fis. José Luis Quijano León *

1. INTRODUCCION

1.1 Qué es un isótopo

Un modelo simplificado del átomo consiste de un núcleo el cual se encuentra rodeado de una nube de electrones. El núcleo, a su vez, está formado de protones y neutrones. Los electrones están cargados negativamente y los protones, positivamente. Los neutrones, como su nombre lo indica, son eléctricamente neutros. Cuando un átomo no está cargado eléctricamente el número de electrones que orbitan, alrededor del núcleo es igual al número de protones.

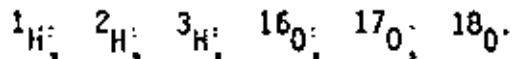
El número de protones de un átomo se conoce como número atómico. Cada uno de los elementos químicos está caracterizado por un número atómico. Así, el número atómico del hidrógeno es 1 y el número atómico del oxígeno es 8. La suma de protones más neutrones de un átomo se denomina número másico.

Se conoce como isótopos a los átomos que tienen igual número atómico; pero diferente número másico. Por ejemplo, el hidrógeno tiene tres isótopos: el hidrógeno 1, cuyo núcleo está formado por un protón; el hidrógeno 2 ó deuterio, cuyo núcleo está formado por un protón y un neutrón y el hidrógeno 3 ó

* Subdirección de Investigación y Tecnología de Apoyo, SARH.

tritio, cuyo núcleo posee un protón y dos neutrones. A su vez, el oxígeno - tiene tres isótopos: oxígeno 16, oxígeno 17 y oxígeno 18. Todos ellos tienen 8 protones y, su número de neutrones es igual a 8, 9 y 10, respectivamente.

Para identificar a los isótopos de un mismo elemento, el número másico se escribe como un índice superior a la izquierda del símbolo químico del elemento. Por ejemplo:



Como caso particular, ${}^2\text{H}$ también se simboliza por una D (deuterio) y ${}^3\text{H}$ por una T (tritio).

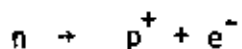
Las propiedades fisicoquímicas de los isótopos de un mismo elemento son muy semejantes. Sin embargo, existen ciertos efectos isotópicos debidos a la diferencia de masas. El estudio de estos efectos en el ciclo del agua, es el objeto de la hidrología isotópica.

1.2 Isótopos estables e isótopos radiactivos

El núcleo de algunos isótopos es estable, es decir, el número atómico y el número másico permanecen siempre iguales. Tal es el caso del H, D, ${}^{16}\text{H}$, ${}^{17}\text{H}$, y ${}^{18}\text{H}$.

Los isótopos, llamados radiactivos poseen núcleos inestables. Con el tiempo, el número atómico, el número másico o ambos se modifican. Por ejemplo, el -

núcleo del tritio (número atómico = 1 y número másico = 3) se transforma en un núcleo de helio 3 (número atómico = 2, número másico = 3). Esto es, uno de los neutrones ha liberado a un electrón de su interior y se ha convertido en un protón:



Los isótopos radiactivos se transforman o decaen de acuerdo a la siguiente ley:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \dots \dots \dots (1)$$

donde:

N_0 = número original de radioisótopos ($t = 0$)

N = número de radioisótopos al tiempo t .

λ = constante característica de cada radioisótopo.

La vida media de un radioisótopo (θ) se define como el tiempo que debe transcurrir para que la mitad del número original de radioisótopos decaiga:

$$\text{Cuando } N = \frac{1}{2} N_0 \quad t = \theta$$

Sustituyendo estos valores en (1) se encuentra que:

$$\theta = \frac{0.693}{\lambda}$$

1.3 Isótopos ambientales y radioisótopos artificiales.

En el medio ambiente existen isótopos cuyo comportamiento está regido por las

leyes del medio. El hombre se limita a observar dicho comportamiento y extraer ciertas conclusiones del mismo. Los isótopos estables pertenecen a este grupo. Existen también algunos radioisótopos ambientales. Estos radioisótopos existen en el medio porque su vida media es muy larga, por ejemplo el uranio 238 cuya vida media es de 4.49×10^9 años, o porque son producidos constantemente por reacciones naturales, por ejemplo el tritio y el carbono 14 que son producidos en la estratósfera por la radiación cósmica. Cabe mencionar que estos dos radioisótopos también han sido incorporados al medio ambiente por ciertas actividades humanas como son las explosiones de artefactos termonucleares en la atmósfera y la operación de centrales nucleoelectricas. Como estas inyecciones no son controladas y afectan a todo el globo o a vastas regiones se consideran parte del medio, aunque su origen sea la actividad humana.

Los isótopos ambientales, pues, son trazadores propios del medio. Entre sus ventajas se pueden mencionar las siguientes.

- . No es necesario añadir sustancias extrañas al medio que hagan las veces de trazadores.
- . Los trazadores ambientales operan a escala regional y aun mundial, lo cual permite seguir movimientos de agua a grandes distancias.

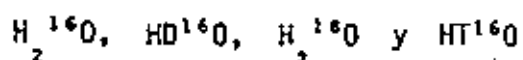
Existe otro tipo de radioisótopos, los cuales son producidos por el hombre en reactores nucleares, en forma deliberada y controlada. Estos radioisótopos pueden ser utilizados como trazadores en problemas geohidrológicos. Se trata, pues, de trazadores artificiales externos al medio. Este tipo de trazadores son útiles para resolver problemas muy localizados y que impliquen tiempos

del orden de unos días o meses.

2. EL CICLO DEL AGUA Y LOS ISOTOPOS AMBIENTALES

2.1 Principales isótopos de interés en el ciclo del agua. Unidades de Medición

La molécula del agua presenta las siguientes configuraciones isotópicas de interés para la hidrología.



La más abundante es $H_2^{16}O$. La concentración de las otras moléculas es del siguiente orden de magnitud.

$$HD^{16}O \sim 10^2 \text{ ppm}$$

$$H_2^{18}O \sim 10^3 \text{ ppm}$$

$$HT^{16}O \sim 10^{-11} \text{ ppm}$$

El carbono 13, estable y el carbono 14, radiactivo, son dos isótopos de interés en geohidrología. Estos isótopos se incorporan al agua en forma de carbonatos o bicarbonatos disueltos.

El contenido en isótopos estables del agua no se mide en forma absoluta, sino relativo a un patrón, conocido SMOW (Standard Mean Ocean Water).

Las unidades de medición son las "delta por mil" y se definen como:

$$\delta \text{ ‰} = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \times 10^3$$

donde:

R es la razón isotópica: $\frac{D}{H} \delta \frac{^{18}O}{^{16}O}$

El tritio se mide en unidades de tritio (U.T.). Una U.T. equivale al átomo de tritio por 10^{18} átomos de hidrógeno.

2.2 Los isótopos estables y el fraccionamiento isotópico. Los procesos de evaporación y condensación

Imaginemos la siguiente situación:

Se tiene una vasija con vapor de agua. El vapor está saturado y, por lo mismo, se empieza a condensar en pequeñas gotas. Tomamos una muestra de vapor y una muestra de líquido y medimos su razón D/H y $^{18}O/^{16}O$.

Observaremos que el contenido en deuterio y oxígeno 18 del vapor es menor que el del líquido. En notación delta, la fase vapor tendrá un valor menor que la fase líquida. Este fenómeno se conoce como fraccionamiento isotópico.

El fraccionamiento isotópico se debe a que la presión de vapor de las moléculas $H_2^{16}O$ es mayor que la presión de vapor de las moléculas $H_2^{18}O$ y $HD^{16}O$.

El factor de fraccionamiento isotópico se define como:

$$\alpha_{L-V} = \frac{R_L}{R_V}$$

donde:

R_L = razón isotópica en la fase líquida

R_V = razón isotópica en la fase vapor.

El factor α es igual al cociente de la presión de vapor de la molécula ligera ($H_2^{16}O$) dividido por la presión de vapor de la molécula pesada ($H_2^{18}O$, $HD^{16}O$). Su propiedad más interesante desde el punto de vista de la hidrología es su dependencia de la temperatura. A altas temperaturas el factor α tiende a la unidad, o sea, el fraccionamiento isotópico desaparece. A bajas temperaturas tiende a infinito, ésto es, a una separación isotópica total.

El agua de mar, fuente primaria de la humedad atmosférica y de la precipitación, presenta valores delta alrededor de cero (El patrón de referencia SMOW es una mezcla de las aguas oceánicas). El vapor originado del agua de mar presenta valores delta negativos, típicamente del orden de

$$\delta D^{\circ}/_{\text{oo}} = -22 \quad \delta^{18} O^{\circ}/_{\text{oo}} = -4$$

El vapor de agua se desplaza hacia el continente donde se precipita en etapas sucesivas. El contenido isotópico de la precipitación depende de varios factores, siendo los más importantes:

- Temperatura. Si la temperatura es alta, el contenido de deuterio y oxígeno 18 será cercano al del SMOW (valores delta cercanos a cero). Si la temperatura es baja, el contenido en deuterio y O-18 será pobre (valores delta más negativos). Una consecuencia directa es que la precipi-

tación en zonas tropicales presenta valores delta cercanos a cero, mismos que se vuelven más negativos conforme la latitud aumenta. Asimismo, en zonas bajas el contenido de deuterio y $O-18$ de la precipitación es mayor que en zonas de montaña.

... Efecto continental. Conforme la masa de humedad se adentra en el continente, la precipitación presenta valores delta cada vez más negativos, debido a que las moléculas pesadas ($H_2^{18}O$ y $HO^{16}O$) se precipitan con preferencia a la molécula ligera ($H_2^{16}O$).

2.3 La línea meteórica y la línea de evaporación

Los valores δD y $\delta^{18}O$, a nivel mundial del contenido isotópico de la precipitación muestran una relación lineal del tipo

$$\delta D \text{ ‰} = 8 \delta^{18}O \text{ ‰} + d \quad \dots \dots \dots (2)$$

donde

d se conoce como exceso de deuterio, siendo su valor típico igual a 10, aunque en ciertas regiones puede alcanzar valores del orden de 20 a 25 (ver figura 1).

Así pues, aguas subterráneas cuyo contenido isotópico coincida con el de la línea meteórica, significa que son aguas de precipitación que se infiltraron sin sufrir modificación en su contenido isotópico.

Por otra parte, si realizamos un muestreo periódico de las aguas de un embalse natural o artificial, a medida que su volumen decrece por evaporación, encontraremos que los valores δD y $\delta^{18}O$ muestran también una relación lineal; pero cuya pendiente varía de 4 a 6, y el exceso de deuterio muestra generalmente valores negativos (ver figura 1). La ecuación tendrá la forma

$$\delta D_{\text{‰}} = m \delta^{18}O_{\text{‰}} + d$$

donde:

m varía de 4 a 6.

Por tanto, en base al contenido isotópico, es posible identificar aguas subterráneas que han estado sujetas a procesos de evaporación parcial antes de infiltrarse.

2.4 Relación entre el contenido isotópico y la altura de la precipitación.

Como se mencionó anteriormente, el contenido de deuterio y oxígeno 18 de la precipitación depende inversamente de la altura. La variación de $\delta^{18}O$ es del orden de 0.1 a 0.5 ‰ por cada m.

Las regiones con orografía accidentada, como es el caso de la mayor parte del país, presentan variaciones notorias en el contenido isotópico de la precipitación. Estas variaciones son muy útiles para identificar zonas de recarga.

2.5 Relaciones entre salinidad y contenido isotópico.

El aumento de la salinidad de las aguas subterráneas es un problema frecuente

mente aparejado a su explotación. Entre las causas más importantes pueden citarse las siguientes:

- . Evaporación por recirculación del agua de riego.
- . Interacción agua-roca, en particular depósitos evaporíticos.
- . Intrusión de aguas salinas, especialmente agua de mar.
- . Infiltración de aguas superficiales de mala calidad.

En el caso de evaporación, tanto los isótopos pesados (deuterio y oxígeno 18) como el total de sólidos disueltos se concentran en la fase líquida. Como consecuencia se espera que exista una correlación lineal entre δD ó $\delta^{18}O$ y la variable TsD o cloruro, que es el ión más conservativo, (ver figura 2).

Salvo sistemas cuya temperatura es superior a los 100°C, el intercambio de deuterio y oxígeno 18 entre el agua y la roca es prácticamente nulo. Así pues, al circular el agua en el subsuelo aumenta su salinidad al disolver a la roca, mientras que su contenido isotópico permanece el mismo. Este hecho es particularmente útil para identificar procesos de salinización por disolución de depósitos evaporíticos (ver figura 2).

En los dos últimos casos, el contenido de deuterio y oxígeno 18 del agua subterránea, así como su contenido en los iones más conservativos, se ajustará a una línea de mezcla entre el agua original y el agua de mala calidad (ver figura 2).

2.6 Los isótopos radiactivos y el concepto de reloj natural.

Imaginemos que tenemos cierta cantidad de agua a la cual añadimos 100 unidades de tritio y la depositamos en un recipiente cerrado. Al cabo de cierto tiempo, digamos 1 año, medimos la concentración de tritio y encontramos que es menor de 100, debido al decaimiento radiactivo. En otras palabras, si conocemos la concentración original y el sistema permanece cerrado, es posible determinar cuándo fue depositada el agua en el recipiente. El tritio, pues, es una especie de reloj natural.

En los sistemas naturales, la situación es más complicada, ya que éstos no son cerrados y la concentración del tritio del agua de recarga no es consecuente.

El tritio tiene una vida media de 12.26 años. Por lo mismo, cuando el agua subterránea está libre de tritio, se puede concluir que fue infiltrada hace más de 40 años. Si el agua subterránea tiene tritio significa que es agua de recarga reciente o una mezcla de agua antigua con agua reciente.

Con el objeto de tener una idea de los niveles de concentración de tritio en el país, se da a continuación una relación del contenido de tritio de la precipitación pluvial en Veracruz:

1967	39.0 U.T.	1973	10.7 U.T.
1968	22.2 U.T.	1974	12.1 U.T.
1970	24.7 U.T.	1975	8.6 U.T.
1971	19.4 U.T.	1976	7.1 U.T.
1972	14.5 U.T.	1977	8.7 U.T.

3. PROBLEMAS GEOHIDROLOGICOS QUE PUEDEN SER RESUELTOS CON AYUDA DE LOS ISOTOPOS AMBIENTALES

Los problemas típicos que requieren de las técnicas isotópicas se enumeran a continuación. Durante el curso, estos problemas se ilustrarán con ejemplos concretos.

- a) Identificación de zonas de recarga
- b) Mezcla de aguas de origen diferente
- c) Comunicación entre acuíferos
- d) Procesos de salinización del agua subterránea
- e) Dotación de aguas subterráneas
- f) Interacción entre agua superficial y agua subterránea
- g) Intrusión de agua de mar.

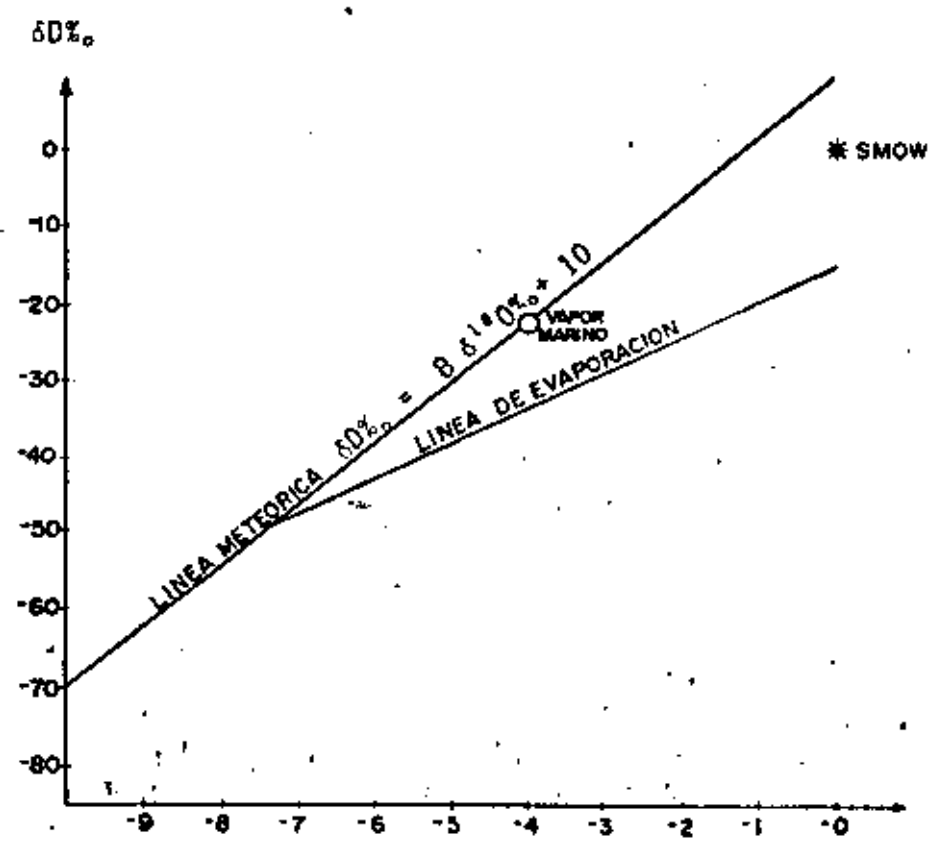


FIG. 1

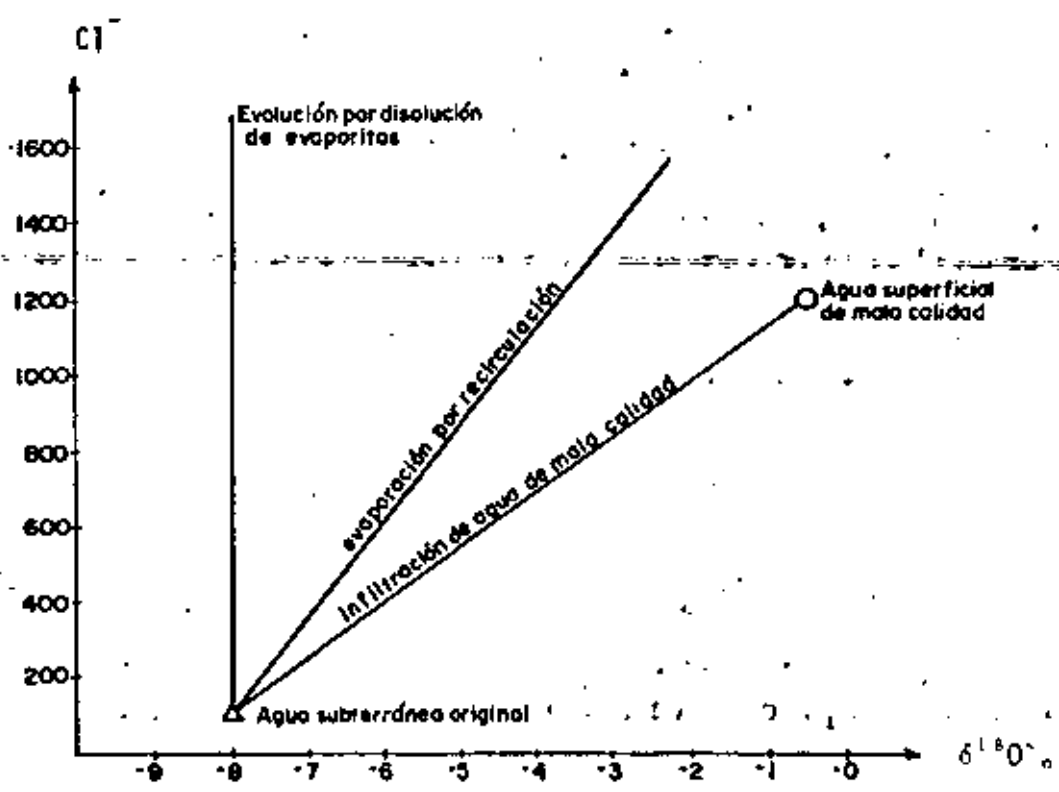


FIG. 2

ALGUNOS ASPECTOS DE LA GEOHIDROLOGIA ISOTOPICA DE LA REGION DE VALSEQUILLO.

Luis Quijano L.¹,

Bryan R. Payne²,

Carlos Latorre D.¹

1 Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Ciudad de México, México.

2 Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena, Austria.

ABSTRACT

The study of the natural variations in environmental isotope content of the surface and groundwaters in the Valsequillo Region, Mexico, is used to solve some questions related to the aquifers behaviour. The results allow to corroborate the occurrence of an underground flux from the Oriental Basin towards the study area. It can also be assessed the importance of excess of irrigation-water on the aquifers recharge. Finally, it was confirmed that travertines and Alluvial Deposits in the Valley were Tehuacan City is located work as a single aquifer.

RESUMEN

El estudio de las variaciones naturales del contenido de isótopos ambientales de las aguas subterráneas y superficiales de la región de Valsequillo fue aplicado a la solución de algunos interrogantes en el funcionamiento de los acuíferos. Los resultados fueron útiles para corroborar la existencia de un flujo subterráneo de la Cuenca de Oriental hacia la zona de estudio. Se pudo evaluar, también, la influencia de los excedentes de agua de riego en la recarga de los acuíferos. Por último, se comprobó que los rellenos aluviales y los travertinos, localizados en el Valle de Tehuacán, se comportan como un sistema acuífero único.

1. INTRODUCCION

1.1 Descripción de la zona y geología.

En la figura 1 se describe la región de Valsequillo. Su clima es templado semi-árido, con una precipitación anual promedio de 710 mm (SRH, 1972).

En la Cuenca de Oriental la precipitación promedio es de 560 mm y en la zona del Volcán Citaltepetl supera los 2000 mm. El Río Atoyac es la única corriente superficial de importancia. Las aguas del río son almacenadas en la Presa Avila Camacho, de donde son distribuidas a las tres unidades agrícolas. En las zonas de Acatzingo, Palmar de Bravo y Cañada Morelos el riego se realiza con aguas subterráneas exclusivamente.

La geología de la zona ha sido descrita en dos estudios geohidrológicos a cargo de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (CHCVM, 1967; SRH, 1974). Las unidades estratigráficas principales son las siguientes:

Calizas del Cretácico (Kc)

La mayor parte de las elevaciones, sierras de Cuesta Blanca, Monumento, Tezoyocan y Zapotitlán, están constituidas por calizas y dolomitas del Cretácico. En cañada Morelos también se encuentran afloramientos de estas rocas. Estos sedimentos de origen marino se encuentran asimismo en la Cuenca de Oriental, subyaciendo a depósitos de relleno más recientes. Estas calizas presentan fracturamiento y estratificación así como cavidades de disolución.

Terciario volcánico andesítico basáltico (Tvab)

Esta formación aflora en el Cerro de la Malinche y constituye el basamento de la Sierra del Citaltepetl.

Terciario Superior lacustre (Tsl)

Estos depósitos de calizas se localizan entre las sierras de Tepcaca y del Tenzo. Su espesor es del orden de 100 m.

Terciario Cuaternario basaltos (TQb)

Material basáltico con olivino y un alto grado de fracturamiento, cuyos afloramientos se distribuyen en toda la región de Valsequillo y gran parte de la Cuenca de Oriental, incluyendo al volcán Citaltepetl que surgió en el Cuaternario Superior.

Cuaternario travertinos (Qt)

Esta estructura aflora en la ladera noreste de la sierra de Zapotitlán, en las cercanías de Tehuacán. Se estima que estos materiales se encuentran en el subsuelo de la Tercera Unidad agrícola.

Cuaternario depósitos aluviales.

Las partes planas se encuentran cubiertas por depósitos recientes de tipo aluvial sin consolidar, arenas, limos y arcillas, cuyo espesor varía de centímetros a 10 m. Las partes bajas de la Cuenca de Oriental están rellenas por sedimentos piroclásticos de arenas pumfíticas y cuarzo, altamente permeables.

Los acuíferos de Valsequillo se recargan por las infiltraciones de la precipitación local y por retorno de aguas de riego. Adicionalmente, se supone que el Valle de Palmar de Bravo recibe una recarga subterránea proveniente de la Cuenca de Oriental. El agua subterránea de Palmar de Bravo se desplaza hacia la Primera Unidad agrícola, la cual drena hacia el río Atoyac. En Cañada Morelos existe un flujo subterráneo con dirección sur, a lo largo de la pronunciada pendiente del valle, que posiblemente recargue a los acuíferos de la Tercera Unidad. En esta unidad el nivel freático se ha elevado considerablemente en los últimos años. En la Cuenca de Oriental debe pensarse en la existencia de dos acuíferos, el de rellenos aluviales y el de calizas.

1.2 Los problemas.

La finalidad de este estudio fue complementar al estudio geohidrológico de la región (SRH, 1976). Específicamente se investigaron tres problemas:

- a) Si el Valle de Palmar de Bravo recibe recarga subterránea proveniente de la Cuenca de Oriental.
- b) Las causas que han provocado una elevación del nivel freático de los acuíferos de la Tercera Unidad agrícola.
- c) Investigar en esta misma unidad, si existe comunicación entre las formaciones acuíferas de origen aluvial y los depósitos de travertinos.

2. METODOLOGIA

En la figura 3 se localizan los aprovechamientos mostrados y en la tabla 1 se describen los mismos y se dan los resultados isotópicos. Los resultados se expresan en las unidades delta convencionales, siendo el error analítico

$$1.0 \delta D\text{‰} \quad \text{y} \quad 0.1 \delta^{18}\text{O}\text{‰}$$

Los problemas propuestos han sido tratados de la siguiente manera:

- Utilización de las variaciones espaciales del contenido en isótopos estables del agua subterránea para determinar direcciones de flujo.

- Se hace uso implícito de la dependencia funcional entre el contenido isotópico de la precipitación y la altura a que ocurre, para decidir si existe o no flujo subterráneo entre cuencas cuya altura promedio es diferente.

- Se ha tratado en la medida de lo posible relacionar la composición isotópica del agua con el tipo de formación acuífera.

- El enriquecimiento en isótopos estables pesados del agua almacenada en la Presa Avila Camacho, por efecto de la evaporación parcial, ha sido aprovechado para investigar la influencia de los retornos de riego en la recarga de los acuíferos.

- El contenido de tritio se ha utilizado como indicador cualitativo del tiempo de tránsito del agua subterránea, así como de la ocurrencia de recarga reciente.

- En unas pocas muestras se analizó el contenido de carbono-13 y carbono-14 con la intención de determinar tiempos de tránsito y naturaleza geológica del medio. Esto solo se logró parcialmente por falta de información.

- La información geoquímica se utilizó como apoyo a los resultados isotópicos. En la presente exposición no se incluirá esta información por falta de espacio. Los lectores interesados pueden consultar el informe original (Quijano et al., 1979)

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Cuenca de Oriental.

En la figura 4 se han graficado los contenidos en deuterio y oxígeno-18 de las muestras de Oriental, Palmar de Bravo y Cañada Morelos. Las muestras 9M y 10M corresponden a dos manantiales localizados en las estribaciones del Citlaltepetl, cuyas descargas se encuentran aproximadamente a 2,700 m. (9M) y 3,000 m. (10M) sobre el nivel del mar. Su composición química es muy semejante (Quijano et al., 1979); pero su contenido isotópico difiere notablemente. El contenido de tritio de 10M (36 U.T.) indica que son aguas de infiltración reciente; mientras que el contenido de 9M (2 U.T.) indica una contribución menor de aguas de infiltración reciente. Estos manantiales sirven de descarga a sistemas fracturados independientes entre sí y su contenido en isótopos estables caracteriza al agua infiltrada en las estribaciones del Citlaltepetl.

La muestra 5G proviene de una galería situada en la Sierra de Cuesta Blanca. Su contenido en isótopos estables indica que la zona de recarga se lo-

caliza en el Citlaltépetl, a una altura promedio mayor que la de los manantiales 9 y 10M. Se trata, pues, de aguas que circulan a través de las calizas del cretácico, subyacentes a los materiales de relleno del Valle de Oriental, y brotan en las calizas de la Sierra de Cuesta Blanca. Los isótopos del carbono apoyan esta interpretación. La $\delta^{13}\text{C}$ del manantial 10M es -12.86, mientras que el de 5G es -7.53. Esto es, ha habido un corrimiento positivo debido al intercambio con los carbonatos de las rocas cretácicas.

La composición isotópica de los pozos 8 y 27P, situados cerca de Ciudad Serdán en Oriental, indica que la recarga tiene lugar principalmente en las estribaciones del Citlaltépetl. Debido a que se sitúan debajo de la línea meteorológica, no se excluye una posible aportación menor de recarga local representada, como se verá por los pozos 9, 25 y 26P.

Los pozos 9, 25 y 26P, localizados hacia el noroeste de la cuenca, representan un grupo con un contenido isotópico enriquecido en oxígeno-18 y deuterio en comparación a las muestras anteriores. La posición de los pozos 9 y 26P en la gráfica δD vs $\delta^{18}\text{D}$ sugiere que el agua está afectada por evaporación parcial; no así en el caso del pozo 25P. Sin embargo, los tres pozos son químicamente semejantes y su contenido en cloruros y sulfatos es bajo (Quijano et al., 1979). Estos resultados sugieren que la evaporación tuvo lugar durante el evento mismo de la precipitación; dada la baja humedad ambiental de la zona. Se considera que estos 3 pozos caracterizan el agua originada de la infiltración de la lluvia en las partes bajas de la cuenca de Oriental.

3.2. Valle de Palmar de Bravo.

Las muestras de Palmar de Bravo pueden distribuirse en dos grupos (fig. 4).

El primero está formado por las muestras 7P, 20P, 40-43P, las cuales se localizan hacia el este del Valle y presentan contenidos en isótopos estables semejantes a los contenidos de los manantiales 9 y 10M y de los pozos de Oriental. La $\delta^{13}\text{C}$ del pozo 20P es igual a -4.22, lo cual indica un considerable intercambio con rocas calizas. Estos resultados permiten concluir que las muestras 7P, 20P y 40-43P provienen de las calizas del cretácico, las cuales forman una misma unidad acúfera en Palmar de Bravo y en la Cuenca de Oriental y reciben gran parte de su recarga de la precipitación en el Citlaltépetl.

Un segundo grupo lo forman las muestras que, a partir de 3M, se distribuyen a lo largo de una línea de enriquecimiento en la dirección de las muestras 9 y 26P.

Los valores más positivos de δD y $\delta^{18}\text{O}$ en relación al primer gru

po indican que este segundo grupo representa aguas de recarga local, originadas de la precipitación en la Sierra de Cuesta Blanca y en el valle mismo. Su exceso de deuterio es menor que el correspondiente al primer grupo. El enriquecimiento isotópico de este grupo apoya la existencia de un flujo de la Cuenca de Oriental hacia Palmar de Bravo, sugerido por las configuraciones piezométricas. La ecuación de regresión lineal de las variables δD y $\delta^{18}O$ (muestras 6P, 9P, 26P, 28P, 44-47P) es la siguiente:

$$\delta D_{\text{‰}} = (3.98 \pm 1.20) \delta^{18}O_{\text{‰}} - (33.4 \pm 11.9)$$

$$r^2 = 0.65 \quad \delta_{y-x} = 1.3$$

El comportamiento de los iones bicarbonato, que es el predominante, y cloruro también apoyan la existencia de dicho flujo (Quijano et al., 1979).

Algunas muestras de este segundo grupo presentan un contenido de tritio bajo; pero significativo (la 3 U.T.), lo cual confirma su carácter de aguas de recarga local, en contraste con las aguas del primer grupo que no tienen tritio.

3.3 Cañada Morelos.

El contenido en isótopos estables de las muestras 19P y 4G es semejante al del manantial 9M, mientras que la muestra 2M tiene un contenido semejante al de 10M. Si se tiene en cuenta que las elevaciones máximas en la zona de Cañada Morelos son del orden de 2,700 m, esto es, comparables al nivel de descarga de los manantiales 9 y 10M, puede concluirse que los aprovechamientos 19P, 4G y 2M captan agua proveniente en su mayor proporción del macizo del Citlaltepetl. La muestra 19P no contiene tritio. Su $\delta^{13}C$ es igual a -9.28, lo cual indica que el agua ha estado en contacto con las calizas.

3.4 Tercera Unidad agrícola.

En la gráfica δD vs $\delta^{18}O$ (fig. 5) se distinguen tres muestras empobrecidas: 1G, 16P y 3P. La muestra 1G procede de la Galería Cipapa, localizada en la Sierra de Zapotitlán. Su composición química refleja claramente la naturaleza dolomítica del medio por el cual circula el agua. El contenido de tritio sugiere que cierta proporción del agua alumbrada es de recarga reciente. La muestra puede considerarse representativa de la precipitación en la Sierra de Zapotitlán, cuya altura media es del orden de 2400 m. Las muestras 16P y 3P se localizan al pie de la Sierra del Monumento en la zona donde se inicia la Cañada Morelos. Su contenido en isótopos estables es semejante al del manantial 2M, lo cual indica que la 3ra. Unidad agrícola recibe una alimenta-

ción subterránea de Cañada Morelos. El contenido de tritio del pozo 16P indica que las aguas se infiltraron más de 50 años, lo cual es de esperarse si las aguas proceden de Cañada Morelos.

Las muestras 1M, 4P, 5P, 17P, 18P, 35P, 2G, 3G, 6-9G forman un grupo cuyo contenido en deuterio y oxígeno-18 es homogéneo. Los valores promedio son los siguientes:

$$\delta^{18}\text{O}\text{‰} = -10.46 \pm 0.15$$

$$\delta\text{D}\text{‰} = -76.9 \pm 1.0$$

Las muestras 3P, 34P, 36P y 39P se ajustan a una línea de mezcla entre el grupo anterior y las aguas de la Presa A. Camacho, lo cual prueba que el agua de riego se infiltra en el área central de la 3ra. Unidad, donde se localizan estos pozos. El contenido de tritio del pozo 3P (12.6. U.T.) indica que son agua de infiltración reciente, en conformidad con la existencia de recarga de excedentes de riego.

La homogeneidad isotópica del agua de los pozos 4P, 5P, 17P, 18P, 35P, 38P, del manantial 1M y de las galerías 2G, 3G, 6-9G sugiere que travertinos y rellenos aluviales se comportan como un solo sistema. Más aún, si se compara el contenido en oxígeno-18 y deuterio, así como la composición química del manantial y las galerías mencionadas con el contenido y composición del agua de la galería Cipiapa (1G), localizada en la Sierra de Zapotitlán se observan diferencias significativas. En otras palabras el agua del manantial 1M y de las galerías 2G, 3G, 6-9G no proviene únicamente del sistema cárstico de la sierra de Zapotitlán, sino también en parte del acuífero en rellenos aluviales. Los resultados químicos apoyan esta interpretación, ya que el contenido de cloruros y sulfatos del manantial 1M y de las galerías es semejante al de los pozos en rellenos aluviales (Quijano et al., 1978).

Por lo expuesto anteriormente es evidente que la elevación del nivel freático observado en los últimos años en la parte central del valle se debe a la infiltración de excedentes de riego. En la zona conocida como el "Sumidero", cerca del poblado de Cuayucatepec al pie de la Sierra Monumento, se ha observado también una elevación del nivel freático. Ahora bien, el contenido isotópico de los pozos 16P y 37P indica que el agua de la zona proviene de Cañada Morelos. Probablemente, la elevación del nivel freático en esta zona es un efecto de la elevación en la zona central. Esto es, la configuración piezomática anterior al inicio del riego con aguas superficiales ha sido modificada de tal manera que la entrada subterránea al valle de Tehuacán proveniente de Cañada Morelos ha sido obstaculizada parcialmente, provocándose una alza del nivel freático.

4. CONCLUSIONES

4.1 Los resultados isotópicos sugieren que el sistema acuífero de calizas del Cretácico de la cuenca de Oriental se extiende hacia la zona este de Palmar de Bravo y hacia Cañada Morelos hasta el Valle de Tehuacán. La principal zona de recarga se localiza en los derrames basálticos del macizo del Citlaltépetl. Es posible que reciba una recarga secundaria a través de los depósitos aluviales en los valles de Oriental, Palmar de Bravo y Cañada Morelos.

4.2 Los depósitos aluviales del Valle de Palmar de Bravo reciben una recarga subterránea proveniente de Oriental, en la dirección El Seco-San Simón.

4.3 La Tercera Unidad de riego recibe una recarga subterránea de Cañada Morelos, a través de las calizas subyacentes a los depósitos aluviales.

4.4 Las infiltraciones de agua de riego proveniente de la Presa Avila Camacho son las responsables directas de la elevación del nivel freático en la zona central de la Tercera Unidad. Indirectamente deben ser también responsables de la elevación del nivel freático en las inmediaciones de la Sierra del Monumento, ya que al modificar la configuración piezométrica original han bloqueado al flujo subterráneo proveniente de Cañada Morelos.

4.5 El acuífero en depósitos aluviales y el acuífero en travertinos de la Tercera Unidad se comportan como un mismo sistema desde el punto de vista hidráulico. Al sur de la Ciudad de Tehuacán la situación es la misma.

5. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de la Residencia de Geohidrología y de Zonas Áridas del Estado de Puebla su ayuda en la realización del muestreo. Asimismo, se agradecen los comentarios de los Ingenieros Rubén Chávez y Juan-Manuel Lesser durante el desarrollo del estudio.

6. REFERENCIAS

Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1967
Las aguas subterráneas del Sistema Apan Oriental, México, D. F.

Organismo Internacional de Energía Atómica, 1979.
Environmental Isotope Data No. 6: World Survey of Isotope Concentration

in Precipitation (1972-1975). Technical Reports Series No. 192, Viena.

Quijano L., Payne B. R., Latorre C., 1979.

Algunos aspectos de la geohidrología isotópica de la región de Valsequillo, Puebla. Informe interno, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1972.

Isoyetas medias anuales de la República Mexicana, período 1931-1970
México, D. F.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1974

Estudio geohidrológico preliminar de las zonas de Tepeaca y del Distrito de Riego de Valsequillo en el Estado de Puebla.

México, D. F.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1976

Atlas de agua de la República Mexicana

México, D. F.

CLAVE:	NOMBRE:	¹⁸ O‰	D‰	Título (U.T.)
ORIENTAL, PALMAR DE BRAVO Y CAÑADA MORELOS.				
V-4G	Galería Tizapan	-12.00	-86.1	
V-5G	Galería Cuesta Blanca	-12.95	-91.7	0.7 ± 0.2
V-2M	Manantial La Tasa	-11.23	-78.6	
V-3M	" Gpe. Enríquez	-10.55	-76.0	1.6 ± 0.2
V-9M	" San Martín	-12.04	-85.3	2.0 ± 0.3
V-10M	" Alamillo	-11.24	-79.0	36.5 ± 1.0
V-6P	Pozo 351	-10.23	-72.6	2.9 ± 0.2
V-7P	" Palmar de Bravo	-11.62	-80.1	0.2 ± 0.2
V-8P	" SRH Serdán	-11.57	-83.4	0.5 ± 0.2
V-9P	" SRH El Seco	- 9.26	-68.7	
V-19P	" Chapulco	-11.98	-88.1	0.3 ± 0.2
V-20P	" 411	-11.86	-83.7	0.2 ± 0.2
V-21P	" Gpe. Enríquez	-10.47	-75.0	1.0 ± 0.1
V-22P	" Xaltepec	-10.14	-74.3	
V-23P	" Palmerito	-10.40	-74.9	1.0 ± 0.2
V-24P	" Tuzuapa	-10.42	-71.1	1.1 ± 0.3
V-25P	" Camino El Carmen	- 9.82	-69.6	0.5 ± 0.3
V-26P	" Coaoctepéc	- 9.28	-70.9	0.2 ± 0.3
V-27P	" SRH Serdán	-11.40	-82.9	
V-28P	" Acatzingo	- 9.73	-73.5	0.5 ± 0.2
V-40P	" La Concepción	-11.71	-79.7	
V-41P	" Palmar de Bravo	-11.38	-80.2	
V-42P	" Coacnopalan Sec. 6	-11.56	-79.0	
V-43P	" Coacnopalan Sec. 2	-11.68	-79.6	
V-44P	" La Candelaria	- 9.91	-74.4	
V-45P	" F. Angeles	-10.14	-74.5	
V-46P	" S. Simón	-10.39	-74.6	
V-47P	" S. Simón-Acatzingo	- 9.95	-72.2	

TERCERA UNIDAD

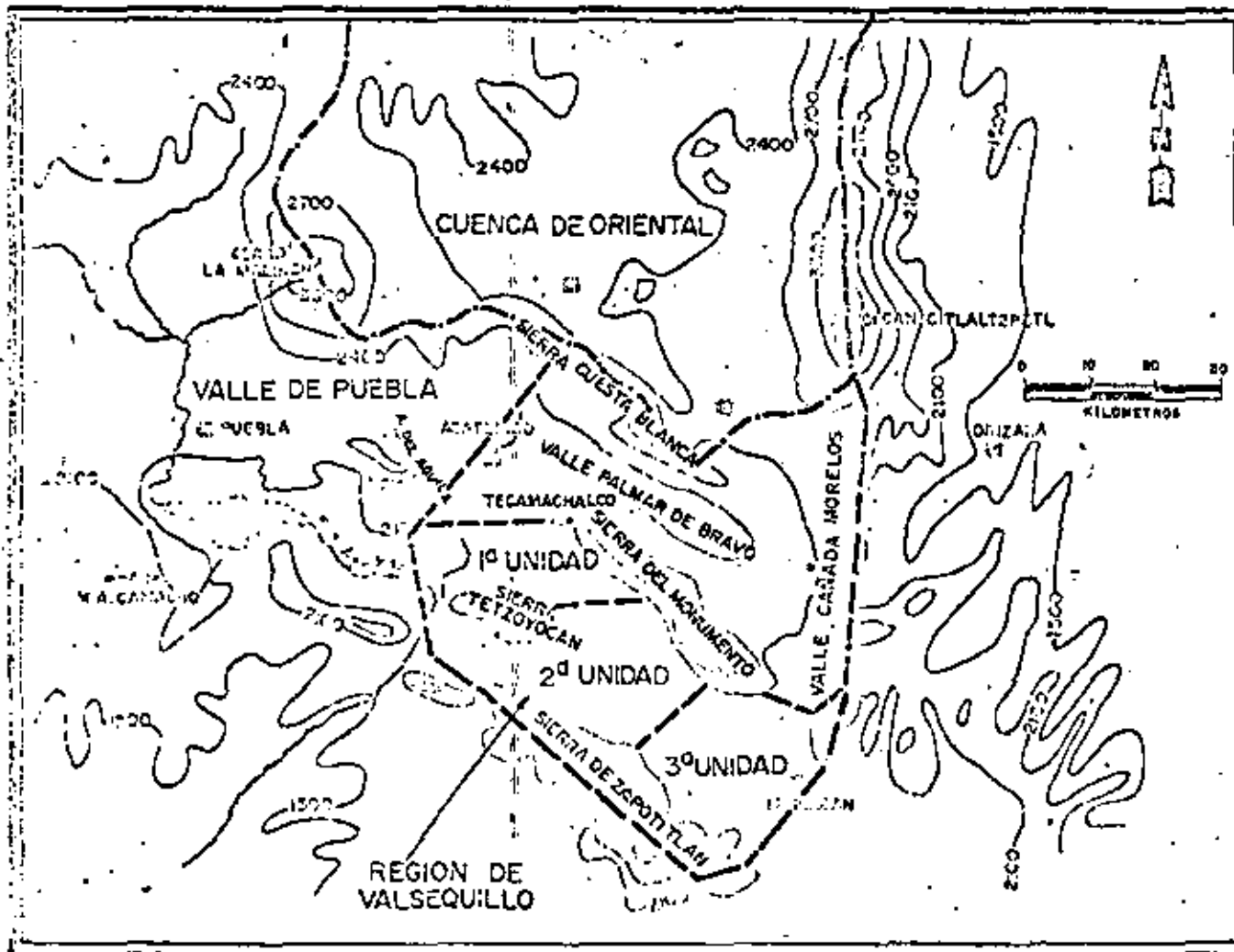
V-1G	Galería	Cipiapa	-11.02	-79.8	2.5 ± 0.2
V-2G	"	Hidalgo	-10.48	-75.5	
V-3G	"	San Juan	-10.60	-76.9	4.6 ± 0.4
V-6G	"	San Marcos	-10.38	-76.8	
V-7G	"	San Isidro	-10.33	-78.3	
V-8G	"	La Aldama	-10.34	-76.5	2.7 ± 0.2
V-9G	"	San Agustín	-10.19	-76.8	6.8 ± 0.3
V-1M	Manantial	San Lorenzo	-10.51	-75.7	3.7 ± 0.2
V-3P	Pozo	190	- 9.83	-71.9	12.6 ± 0.6

CLAVE: NOMBRE:

CLAVE	NOMBRE	¹⁸ O‰	D‰	Trilito (U.T.)
V-4P	Pozo 171	-10.49	-75.3	
V-5P	" Tepanco 166	-10.40	-76.5	
V-16P	" 216	-11.13	-82.5	< 0.3
V-17P	" 217	-10.42	-78.1	0.9 ± 0.3
V-18P	" 186	-10.55	-78.1	0.9 ± 0.2
V-34P	" Pino Suárez	- 9.95	-73.4	
V-35P	" Las Garzas	-10.46	-77.8	
V-36P	" G. Coayucatepec	- 9.13	-67.2	
V-37P	" Coayucatepec	-11.05	-79.3	
V-38P	" Rancho Grande	-10.82	-77.3	
V-39P	Pozo	- 9.93	-72.6	

ISOTOPOS DEL CARBÓN

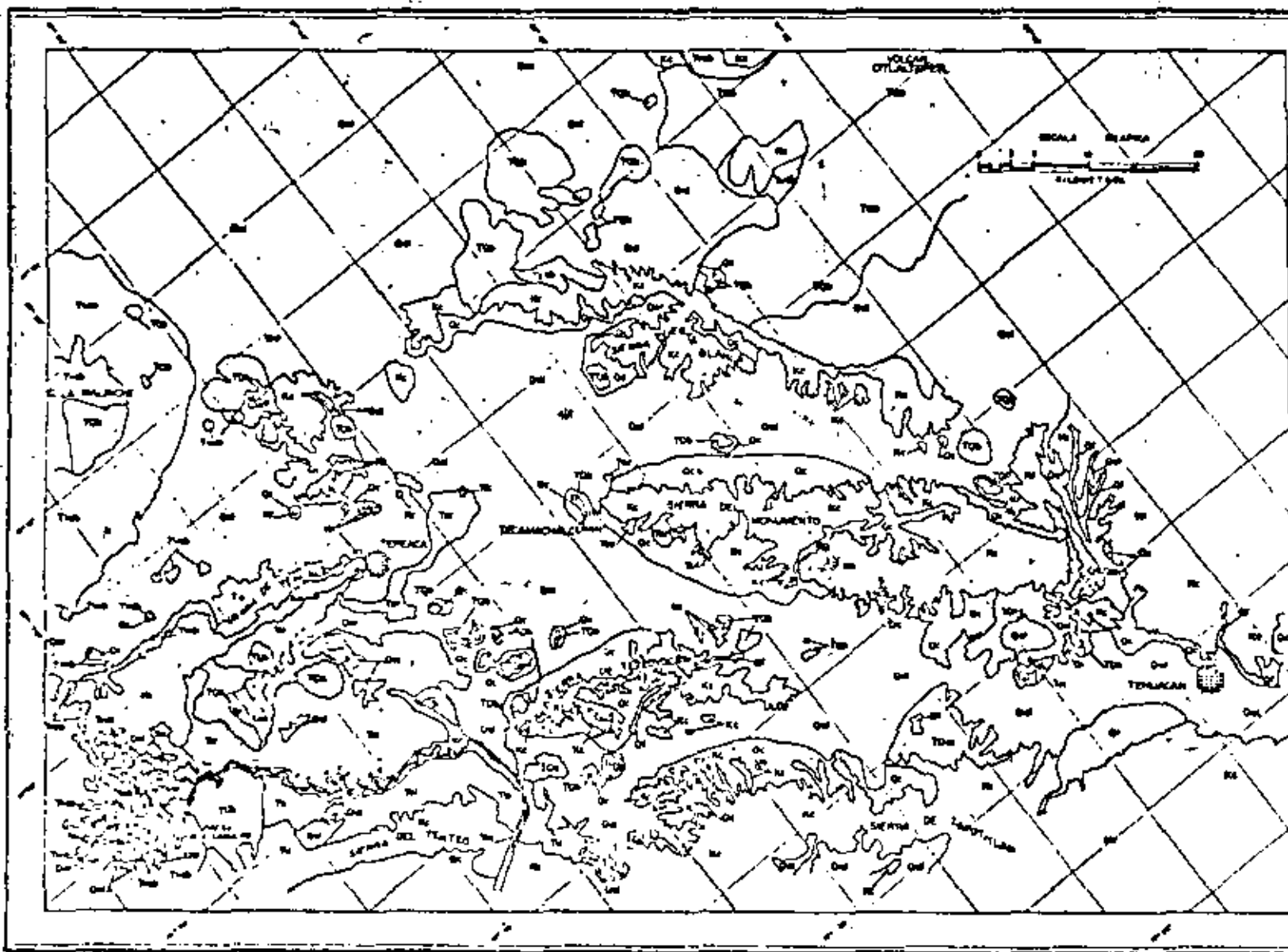
CLAVE	NOMBRE	pH (lab)	¹³ C‰	¹⁴ C (pdm)
V-5G	Galería Cuesta Blanca	8.1	-7.53	49.1 ± 1.6
V-19P	Pozo Chapulco	7.4	-9.28	40.9 ± 1.0
V-20P	" 411	7.6	-4.22	9.1 ± 0.5
V-10M	Manantial Alamillo	7.3	-12.86	



SIMBOLOGIA

-  POBLACION
-  PRESA
-  CURVAS DE NIVEL EN METROS

FIG. 1	ESTUDIO ISOTOPICO VALSEQUILLO, PUEBLA PLANO DE LOCALIZACION
SUBSECRETARIA DE PLANEACION SARH GRUPO DE FISICA	



SIMBOLOGIA

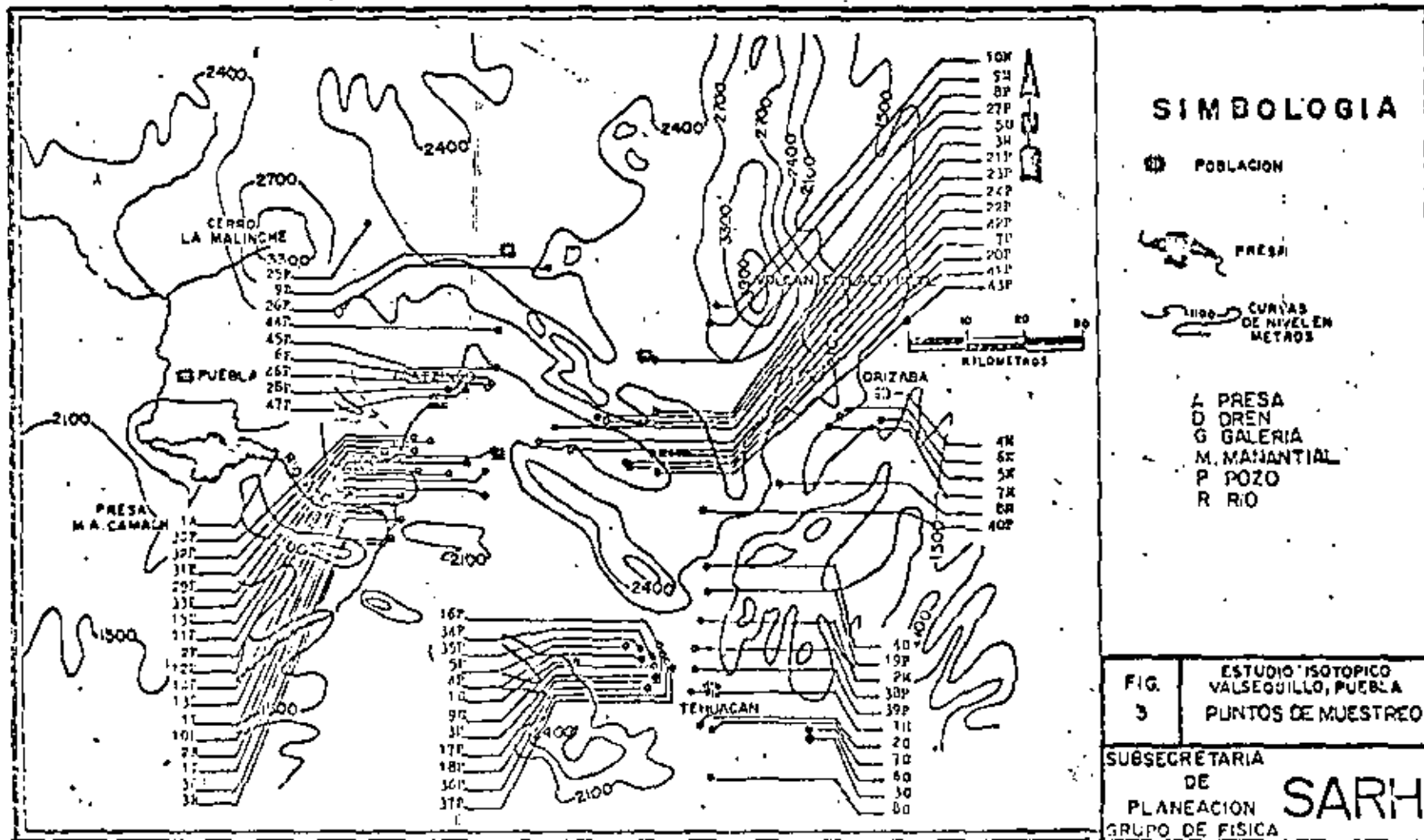
- POBLACION
- RIO
- CONTACTO GEOLOGICO

UNIDADES ESTRATIGRAFICAS

CANTON DE TOLUCA	Qt	CUARTO CUERPO DE LA SIERRA DE TOLUCA	
	Dol	DEPOSITOS DE LA SIERRA DE TOLUCA	
	Oc	ORDOVICIANO	
	Q1	QUATERNARIO	
	CANTON DE TOLUCA	Tob	TERTIARIO
		Toc	TERTIARIO
		Tal	TERTIARIO
	CANTON DE TOLUCA	Tal	TERTIARIO
		Tob	TERTIARIO
		Tvb	TERTIARIO
Tcc		TERTIARIO	
CANTON DE TOLUCA	Kc	CRETACEO	

FIG. 1. ESTUDIO GEOLOGICO DE LA SIERRA DE TOLUCA. PLANO GENERAL. (Escala 1:50,000)

SECRETARIA DE ECONOMIA
 INSTITUTO GEOLOGICO Y MINEROLOGICO
SAF



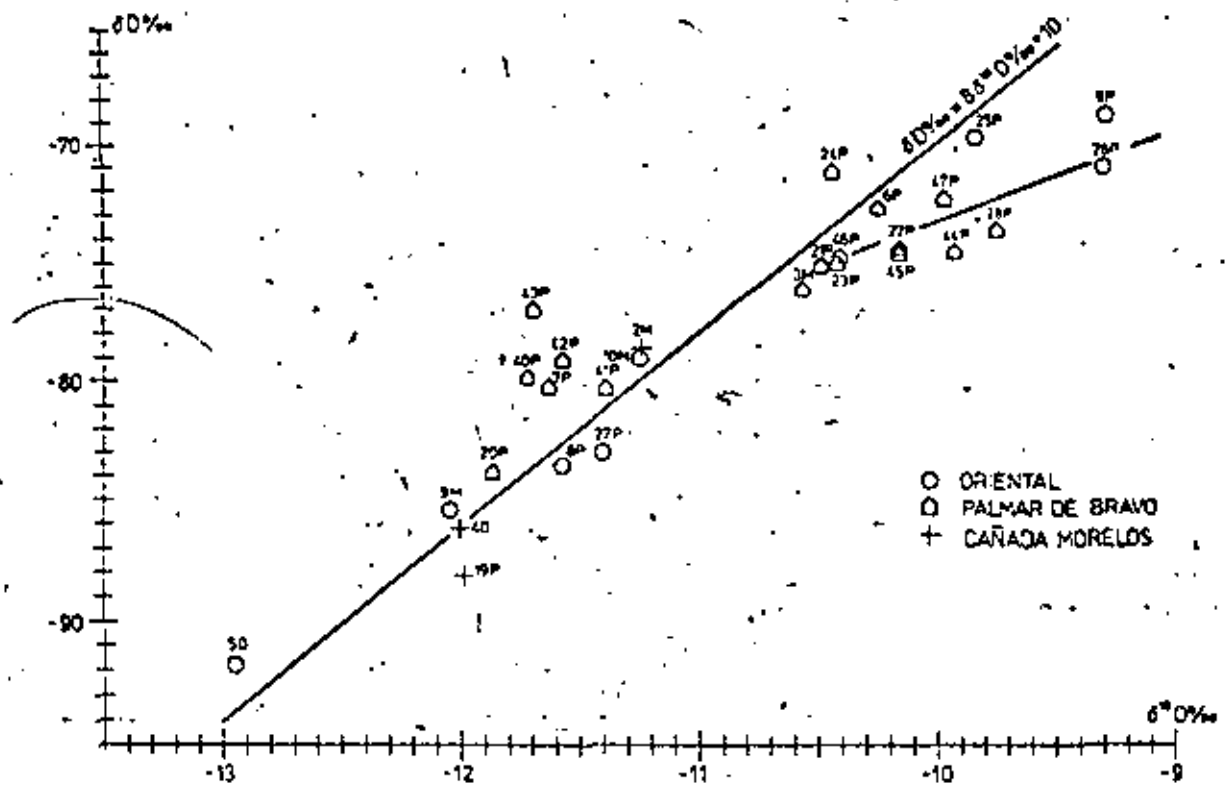


Fig 4.

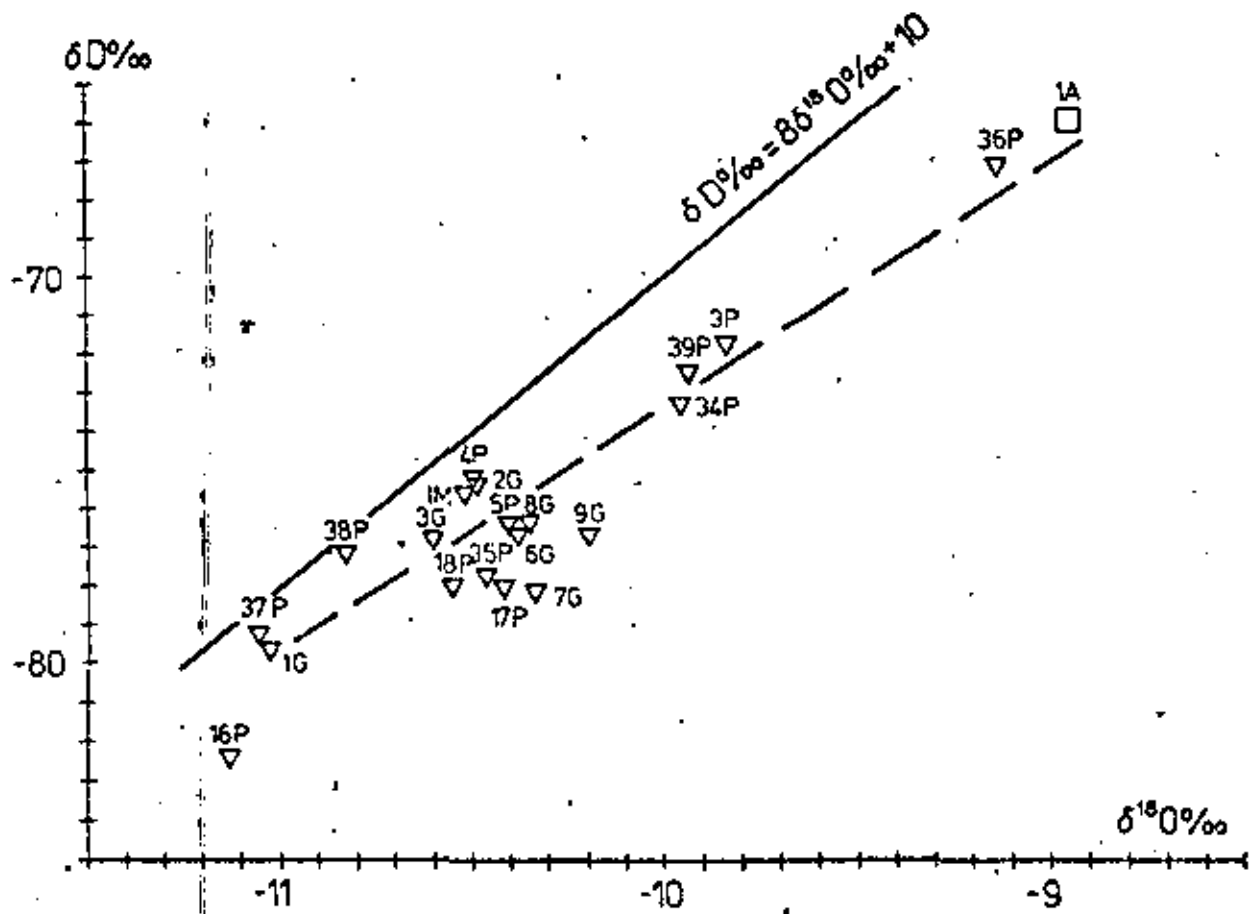


Fig. 5.

[2]

ENVIRONMENTAL ISOTOPES IN A STUDY OF THE ORIGIN OF SALINITY OF GROUNDWATER IN THE MEXICALI VALLEY

BRYAN R. PAYNE¹, LUIS QUIJANO² and CARLOS LATORRE D.²

¹International Atomic Energy Agency (I.A.E.A.), A-1011 Vienna (Austria)

²Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Mexico City (Mexico)

(Received July 5, 1978; accepted for publication September 11, 1978)

ABSTRACT

Payne, B.R., Quijano, L. and Latorre D., C., 1979. Environmental isotopes in a study of the origin of salinity of groundwater in the Mexicali Valley. *J. Hydrol.* 41: 201-215.

The stable-isotopic (δD , $\delta^{18}O$) and chemical composition of waters in the Mexicali Valley are used to study the origin of salinity of groundwater. It is suggested that the present-day stable-isotopic composition of the Colorado River when it enters the valley is more enriched than three or four decades ago owing to evaporation from the reservoirs which have been constructed on the river during this period. This has provided distinctive isotopic labels for "old" and "recent" Colorado River water. On the basis of the sampling, no evidence is found for the salinity being due to partial mixing with seawater. The dominant salinity control is infiltration from the surface water system, but evidence is also presented for part of the salinity being due to dissolution of evaporitic deposits.

INTRODUCTION

The Mexicali Valley is situated in the northwest of Mexico and is defined by the border with the U.S.A. to the north, the Sierra Cucapás to the west, the Altar Desert to the east and the Gulf of California to the south. The topography is monotonous with a gradual gradient to the Gulf of California. The climate is arid with a mean annual precipitation of 36 mm. The main economy is based on agriculture. Exploitation of groundwater commenced in the 1950's which subsequently resulted in a gradual decline of water levels. As exploitation proceeded, zones of high salinity ($> 2,200$ ppm TDS) appeared close to the Colorado River and those zones of high salinity, existing before the 1960's in the northwestern part of the valley, became enlarged. The aim of the study described in this paper was to determine the salinization mechanism in different parts of the valley.

Previous geochemical work in the area has been done by different dependencies of the Secretaría de Recursos Hidráulicos (e.g., Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1967; Palacios-Velez et al., 1978). In 1969 an isotopic study was carried out by the Washington State University (1972) concerning the Cerro Prieto geothermal field.

HYDROGEOLOGY

The Mexicali Valley consists of a large graben whose base consists of igneous and metamorphic intrusions of the Upper Cretaceous and granite, gneiss and schist, which outcrop in the Sierras of Cucapás and Juárez. The Valley fill, consisting of sandstone, gravel, sand, limestone and shale, extends to more than 2,500 m.

The groundwater in the valley is recharged by groundwater coming from the Imperial and Yuma valleys north of the international boundary and also by infiltration from the irrigation canals supplied from the Colorado River at Presa Morelos. Prior to the regulation of the Colorado River, it did not follow a well defined course in the valley and infiltration losses were an important source of recharge to groundwater.

DATA ON SAMPLES

The majority of the samples were from 67 wells while 12 samples were from the surface-water system in the valley. Details of the samples and their location are given in Table I and Fig. 1. All samples were analyzed for their

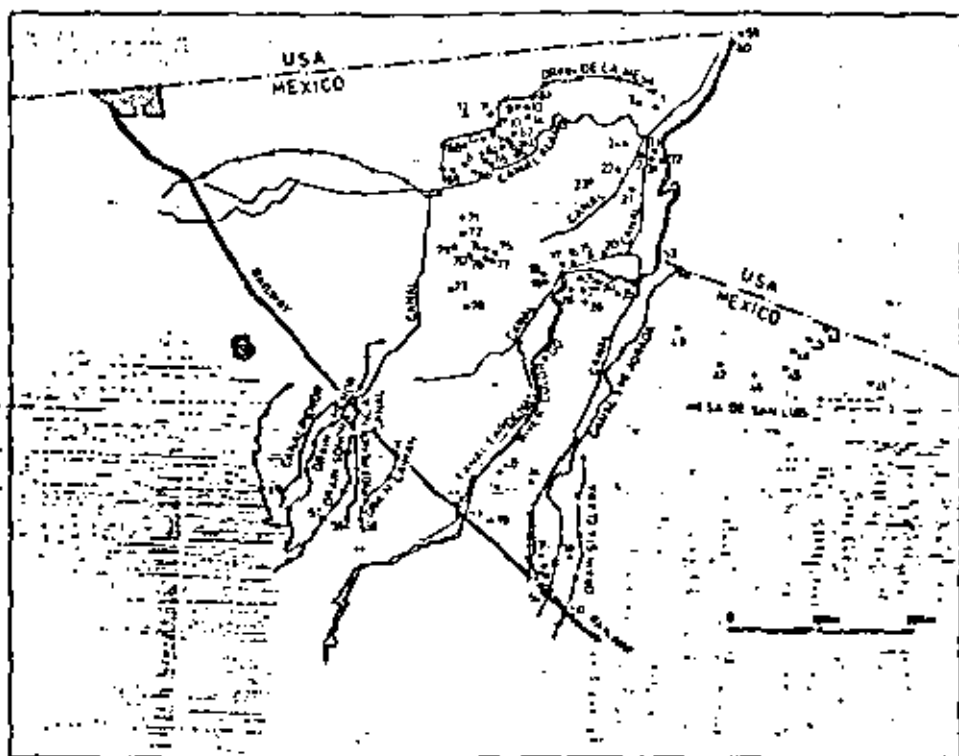


Fig. 1. Location of sampling points.

stable-isotopic and chemical composition and 32 samples were analyzed also for their tritium concentration. The isotopic analyses were made in the Isotope Hydrology Laboratory of I.A.E.A. in Vienna. The analytical errors for δD and $\delta^{18}O$ are ± 1 and $\pm 0.1\text{‰}$ respectively. The analytical errors for tritium are given for each individual analysis. The chemical analyses were made by the Commission for Water of the Valley of Mexico of S.A.R.H.

STABLE-ISOTOPE COMPOSITION OF WATERS IN THE VALLEY

The two principal surface-water systems entering the valley are the canals leading from the Presa Morelos where 1850 Mm³ are diverted annually to the irrigation area and the water coming from the Wellton-Mohawk Drain, which partially discharged from 1960 to 1972 into the Presa Morelos. The other fraction discharged into the Colorado River just below the Presa Morelos, after 1972 the total annual volume of about 260 Mm³ discharged in the point just below the Presa Morelos. The Wellton-Mohawk Drain conveys poor quality drainage waters from the Wellton-Mohawk Irrigation District, Arizona about 50 km upstream of the Presa Morelos (Irelan, 1971). The relatively minor contribution provided by the Sánchez Mejorada Canal is not considered in this study.

Water from the Presa Morelos is characterized by the samples 49, 55, 56, 59, 80, 81, and is estimated to have the following stable-isotopic composition at the 95% confidence level:

$$\delta^{18}O = -12.14 \pm 0.10\text{‰} \quad \text{and} \quad \delta D = -99.0 \pm 0.7\text{‰}$$

Water from the Wellton-Mohawk Drain is estimated to have the following composition at the 95% confidence level based on samples 51, 53 and 60:

$$\delta^{18}O = -11.03 \pm 0.16\text{‰} \quad \text{and} \quad \delta D = -90.2 \pm 0.6\text{‰}$$

Thus these two surface-water systems have different stable-isotope indices although they both have tritium concentrations between 175 and 200 TU. If these two indices are examined in relation to the stable-isotope data of all samples, it will be seen that most of the groundwater samples have a stable-isotopic composition more depleted in heavy isotopes. The variability in isotopic composition suggests a mixing process between water having either the index of the Presa Morelos or the Wellton-Mohawk Drain and water with a much more depleted stable-isotopic composition. The key to the significance of this component is provided by data for wells in the Mesa de San Luis, which were used to study the problem of origin of groundwater in that area.

The δD - $\delta^{18}O$ plot in Fig. 2 is for samples from the Mesa de San Luis. The samples 41-48 inclusive are from a well field located to the north of the Mesa and vary widely in isotopic composition. The axis of the sampled wells is roughly perpendicular to the direction of flow of groundwater and since the stable-isotopic composition of the wells changes systematically moving

TABLE I

Stable-isotopic and chemical composition of groundwaters in the Mexicali Valley

Reference No.	Name	Sampling date	Location of screen (m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	Tritium (TU)	Ca^{++} (ppm)	Mg^{++} (ppm)	Na^+ (ppm)	Cl^- (ppm)	SO_4^{--} (ppm)	HCO_3^- (ppm)
<i>Surface water:</i>												
49	Canal Menor	74 12 16		-12.02	-98.7		83	42	149	227	214	211
50	Drain Sta. Clara	74 12 16		-10.94	-88.6	42.6±1.5	215	41	1,520	1,720	1,190	410
51	Wellton-Mohawk Drain	74 12 16		-11.12	-90.5		174	78	811	996	811	341
53	Wellton-Mohawk Drain	74 12 16		-10.99	-90.0	202 ±6	204	23	1,070	1,200	894	394
54	Canal Sanchez Mejorada	74 12 16		-10.89	-87.0	36.8±1.8	51	47	320	158	214	189
55	Canal Cárdenas	74 12 16		-12.15	-98.2		76	32	235	216	346	196
56	Canal Independencia	74 12 16		-12.15	-98.9	174 ±5	62	56	212	216	356	214
57	Drain Sonora	74 12 16		-12.33	-102.2	69.0±1.7	271	62	1,100	1,650	659	423
58	Drain Carmán	74 12 16		-12.70	-102.6	60.9±2.3	280	75	1,070	1,490	894	410
59	Presa Morelos	74 12 16		-12.18	-100.5	177 ±5	60	60	216	219	345	221
80	Presa Morelos	76 04 30		-12.27*	-98.6							
81	Presa Morelos	76 05 31		-12.05	-99.1							
60	Wellton-Mohawk Drain	74 12 16		-10.98	-90.2	195 ±5	135	76	1,070	1,230	876	426
<i>Wells in Mesa de San Luis:</i>												
41	II-13	74 12 12	68-150	-8.37	-61.4		27	11	239	298	84	161
42	I-8	74 12 12	69-150	-9.05	-70.6		63	23	239	433	82	107
43	II-7	74 12 12	70-150	-9.29	-72.9	0.5±0.3	62	85	240	458	87	114
44	II-6	74 12 12	74-150	-10.17	-79.4		100	33	269	633	136	110
45	IV-6	74 12 12	72-153	-10.36	-80.8		80	25	289	507	138	107
46	V-4	74 12 12	72-152	-13.38	-103.5		47	14	238	306	166	120
47	V-1	74 12 12	71-150	-14.32	-110.6	0.6±0.2	43	14	165	184	105	170
48	V-5-4	74 12 12	73-152	-14.87	-113.8	0.9±0.3	64	21	156	186	124	243
<i>Wells in Northeast and East:</i>												
1	7-Morelos	74 12 11	38-74	-14.34	-109.7		222	65	254	425	428	360
2	4-Deckeron	74 12 11	32-69	-13.69	-108.0	30.3±1	174	30	197	225	379	344
3	2-Cuervos	74 12 19		-12.14	-99.7		83	46	131	231	169	230

15	32-0-1	74 12 10	66-95	-14.52	-111.9		93	27	173	203	177	312
16	34-0	74 12 10	48-81	-13.66	-104.1		173	28	432	572	409	328
17	34-5	74 12 10	69-80	-14.80	-111.3		137	0.0	260	285	234	334
18	1-H	74 12 10	29-76	-14.70	-112.5	6.1±3	163	9.6	287	295	336	385
19	2-H	74 12 10	29-88	-13.15	-105.0	111 ±2.6	145	6.2	317	300	375	334
20	27-0-3	74 12 10		-13.50	-105.0	130 ±4	200	1.1	410	413	489	382
21	15-1-1	74 12 11	4-55	-14.10	-109.4		129	4.5	259	274	273	293
22	15-1-1 Der.	74 12 11	38-67	-14.13	-109.8	26.6±0.7	114	7.4	219	208	248	300
23	4-3-5	74 12 11	43-70	-14.41	-111.4	4.3±0.3	131	4.0	269	293	253	315
24	14-3	74 12 11	37-66	-14.49	-110.9		177	11	370	433	370	309
25	1-Monumentos	74 12 14	29-102	-14.30	-110.9	3.9±0.3	132	37	134	174	177	423
26	3-Moctezuma	74 12 14	29-93	-14.54	-111.6		104	29	96	169	109	312
27	2-Moctezuma	74 12 14	67-96	-14.06	-109.1	3.9±1.4	178	9.8	306	313	375	394
28	3-Hidalgo	74 12 14	36-118	-10.98	-90.7	169 ±5.0	201	87	859	1,200	824	311
29	2-Hidalgo	74 12 14	56-78	-11.42	-92.0	127 ±4	321	103	554	1,030	715	309
30	1-Hidalgo	74 12 14	28-109	-14.11	-108.1		73	38	209	182	273	315
31	72-E	74 12 14		-14.03	-107.7		202	52	157	201	384	366
32	121-C	74 12 14		-11.73	-94.7		345	22	705	1,050	728	322
33	67-E	74 12 14		-12.63	-100.0	78.7±3.8	309	6.2	514	672	653	369

Wells in Northwest and West:

4	1-Treviño	74 12 11	37-70	-12.52	-101.9	198 ±3	229	41	429	516	698	281
5	2-Treviño	74 12 11	41-67	-12.94	-104.2	134 ±4	221	30	454	542	664	262
6	1-Yucatán	74 12 11	45-70	-13.46	-106.8		262	68	688	856	824	413
7	5-L. Cárdenas	74 12 11	27-63	-13.80	-107.8	31.6±1.2	217	57	616	606	760	328
8	3-18 de Marzo	74 12 11	37-95	-14.48	-111.9		49	22	118	141	108	199
9	5-Bórquez	74 12 12	38-119	-14.61	-110.9	2.0±0.2	149	66	254	553	229	233
10	8-Bórquez	74 12 12	30-67	-14.64	-111.5		64	32	117	169	136	208
11	9-Bórquez	74 12 12	27-81	-14.81	-112.4		72	57	223	390	147	252
12	1-J.M. Rodríguez	74 12 12	23-58	-14.77	-114.0		47	25	202	210	206	192
13	7-Villa hermosa	74 12 12	39-106	-14.55	-114.2		100	33	125	246	113	243
14	8-Villa hermosa	74 12 12	76-105	-14.21	-110.5		177	35	392	437	489	394
51	3-Bórquez	76 04 27		-14.66	-110.8		123	53	379	564	316	291
62	1-18 de Marzo	76 04 27		-13.41	-105.4		236	80	549	658	881	340
63	2-18 de Marzo	76 04 27		-14.31	-108.8		223	87	509	715	747	318
64	1-L. Cárdenas	76 04 27		-13.76	-107.0		233	81	352	508	692	315

TABLE I (continued)

Reference No.	Name	Sampling date	Location of screen (m)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)	Tritium (TU)	Ca^{++} (ppm)	Mg^{++} (ppm)	Na^+ (ppm)	Cl^- (ppm)	SO_4^{--} (ppm)	HCO_3^- (ppm)
65	7-L Cárdenas	76 04 27		-13.14	-103.1		189	67	590	309	654	252
66	8-L Cárdenas	76 04 27		-14.03	-108.3		267	81	423	584	830	339
67	1-Norte	76 04 27		-14.32	-110.2		167	54	477	671	472	297
68	1-P	76 04 27		-14.25	-108.8		189	67	492	715	546	412
69	3-Yucatan (R-1)	76 04 27		-14.08	-107.4		211	74	321	414	670	322
70	6-H	76 04 28		-13.87	-108.1		178	64	311	451	444	293
71	286-B	76 04 28		-14.45	-110.7		200	74	422	677	461	368
72	211-B	76 04 28		-13.79	-107.3		189	61	410	602	489	328
73	68-CH (R-82)	76 04 28		-14.36	-111.7		89	34	149	226	146	272
74	9-B-1 Dey	76 04 28		-13.76	-108.2		244	74	364	489	681	393
75	9-B-1 120 (R-40)	76 04 28		-14.64	-110.3		133	61	160	338	200	309
76	9-B-2 120	76 04 28		-13.71	-107.8		278	74	392	664	721	387
77	9-B-3 120	76 04 28		-14.27	-109.5		187	61	290	470	350	343
78	AN-6-b	76 04 28		-13.78	-107.4		256	67	382	499	659	428
79	42-B	76 04 28		-14.06	-107.6		167	40	250	395	311	309
Wells in the South:												
34	5-Cosahuila	74 12 13	64-109	-13.29	-100.6	2.9±0.2	121	19	512	587	399	322
35	2-Nuevo Michoacán	74 12 13	51-91	-11.08	-86.1	1.2±0.3	36	16	370	469	177	149
36	3-Nuevo Michoacán	74 12 13	50-83	-10.65	-83.4		66	27	458	704	139	173
37	4-Nuevo Michoacán	74 12 13	48-90	-9.85	-79.7	0.7±0.3	74	21	673	852	173	129
38	1-Nuevo Michoacán	74 12 13	37-80	-11.63	-90.4	16.1±0.6	120	18	612	702	601	246
39	6-Nuevo León	74 12 13	26-90	-13.61	-103.1	1±0.2	72	15	323	334	167	230
40	150-C	74 12 13		-14.19	-107.7	1.3±0.3	46	25	247	298	180	211

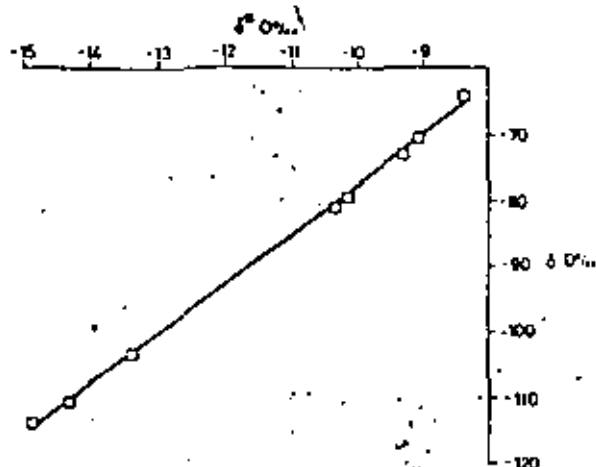


Fig. 2. Stable-isotopic composition of groundwater in the Mesa de San Luis.

across the flow, it is concluded that the well field is located at the confluence of two groundwater flow systems each having a very different isotopic composition. The most positive value from the eastern side of the field suggests that this represents groundwater which originates in the Gila River catchment. This suggestion is supported by the water level contours in 1925 which show a gradient south from Gila River to the International Boundary (Olmsted et al., 1973). The weighted mean stable-isotopic composition of precipitation (I.A.E.A., 1970, 1971, 1973, 1975) for Flagstaff, Arizona, ($\delta^{18}\text{O} = -8.62\text{‰}$, $\delta\text{D} = -66.7\text{‰}$), which is located in the upland drainage of the Gila basin, is very similar to that of sample 41 and supports this conclusion. The most depleted value of well 48 of this group of wells is indicative of recharge at a higher elevation. The location of this well suggests that the groundwater in this area originated as infiltration from the Colorado River whose waters represent run off from the higher Rocky Mountains. However, the insignificant tritium concentration (0.9 ± 0.3 TU) indicates that this water was recharged prior to the detonation of thermo-nuclear devices, that is, certainly before 1950.

Comparison of the stable-isotopic composition of well 48 with the index established for the Presa Morelos system indicates that the latter could have evolved from the former by evaporation occurring in the reservoirs behind the dams which have been constructed on the Colorado River since the 1930's (Hely, 1969). Therefore, the stable-isotope index of "old" Colorado River is similar to that of 48 while the "recent" index is that estimated for the Presa Morelos system. Thus, the stable-isotope values which fall between the "old" and "recent" indices simply reflect varying proportions of "old" and "recent" Colorado River water.

The best estimate for "old" Colorado River was obtained from the most depleted groundwater samples which cover the whole area studied. This index was based upon samples 8-13, 15, 18, 24, 26, 48, 61 and 75 and was

found at the 95% confidence level to be:

$$\delta^{18}\text{O} = -14.64 \pm 0.07\text{‰} \quad \text{and} \quad \delta\text{D} = -112.1 \pm 0.8$$

The "old" Colorado River index thus estimated agrees well with the values for Lake Mead, $\delta^{18}\text{O} = -14.8\text{‰}$, $\delta\text{D} = -111.5\text{‰}$ (Craig, 1966), which can be taken as an estimate of the Colorado River water (Craig, 1969).

ORIGIN OF SALINITY

The following four possible mechanisms for the increase of salinity of the groundwater in the valley have been considered. In each case, the expected stable-isotopic and chemical relationships may be summarized as follows:

(1) *Leaching of evaporitic deposits.* The stable-isotopic composition of the leaching water is conserved independent of the salinity. The concentrations of the cationic and anionic species of the suspected leached evaporitic deposit are highly correlated.

(2) *Concentration of the dissolved salts by evaporation.* The $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ relation is typical of an evaporation process with a slope of 4 to 6 and the increase of salinity, particularly for the more conservative chloride ion, is positively correlated with $\delta^{18}\text{O}$ or δD .

(3) *Infiltration from surface-water systems.* The δD and $\delta^{18}\text{O}$ are linearly correlated between the "old" River Colorado index and the "recent" Colorado River index or the index for the Wellton-Mohawk water. A similar correlation could be expected for the more conservative ionic species.

(4) *Mixing with seawater trapped in the alluvial sediments during their deposition.* The δD and $\delta^{18}\text{O}$ are, together and also individually with chloride, linearly correlated on a mixing line with seawater as one end-point.

In order to study the relative importance of these mechanisms, the data were treated separately in three groups. The first corresponds to samples located nearby the Colorado River where the influence of it is likely to be found. The second comprises samples located where the direct influence of the Wellton-Mohawk Drain can be excluded and processes of evaporation could be stressed due to the presence of topographical depressions and more clayey soils. The last group is located in the southern zone. A partial correlation coefficient matrix for the stable-isotopic and ionic species was computed for the two first groups.

The Northeast and East

This area covers samples fairly close to and along the course of the Colorado River where there are areas of high salinity. The partial correlation

coefficient matrix given in Table II was computed for the samples in this area but excluding 2, 3 and 19, where it will be seen (Fig. 3) that the dominant influence is that of water from the Presa Morelos.

Analysis of variance shows that at the 99% confidence level the partial correlation coefficients less than 0.69 are not significant. The partial correlation coefficients are high for $\delta^{18}\text{O}$ with δD , Cl^- and SO_4^{2-} . The data for these three pairs of variables are plotted in Figs. 3, 4 and 5, respectively.

The following linear regression is computed for the groundwater samples, excepting 2, 3, 19, and is found to fit perfectly on the mixing line between the indices for "old" Colorado River and Wellton-Mohawk Drain water (Fig. 3).

$$\delta\text{D} = (6.08 \pm 0.14)\delta^{18}\text{O} - (23.12 \pm 1.89); \quad r^2 = 0.991 \quad \text{and} \quad s_{y \cdot x} = 0.7 \quad (1)$$

But this regression is indistinguishable from an evaporation process. However, the tritium data suggest that the regression is the result of a mixing process since, local precipitation ruled out, the surface systems are the only possible source of recharge of tritium into the groundwater. Furthermore, from Fig. 4 it will be seen that, being chloride the most conservative ion, the linear correlation of this ion and $\delta^{18}\text{O}$ is indicative of a mixing process. Even samples 2 and 19 exhibit a similar behaviour where from Fig. 3 it will be seen that the mixing is between Presa Morelos water and "old" Colorado River.

TABLE II

Partial correlation coefficient matrix for groundwater samples in the Northeast and East (excluding samples 2, 3 and 19)

	$\delta^{18}\text{O}$	δD	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}
$\delta^{18}\text{O}$	1	0.97	0.74	0.59	0.91	0.96	0.92	-0.25
δD		1	0.66	0.51	0.87	0.89	0.85	-0.26
Ca^{2+}			1	0.33	0.69	0.79	0.85	0.13
Mg^{2+}				1	0.38	0.56	0.49	-0.19
Na^{+}					1	0.96	0.93	-0.17
Cl^{-}						1	0.94	-0.21
SO_4^{2-}							1	0.00
HCO_3^{-}								1

Thus it is concluded that increase of salinity due to partial evaporation is not important.

Mixture with seawater is also eliminated since the regression (1) does not pass through the stable-isotope composition of seawater. Additional evidence against this mechanism is provided by the correlation $\text{Cl}^- - \delta^{18}\text{O}$ which also does not extrapolate through the composition of seawater.

Examination of Fig. 4 shows that in this area there is evidence for the in-

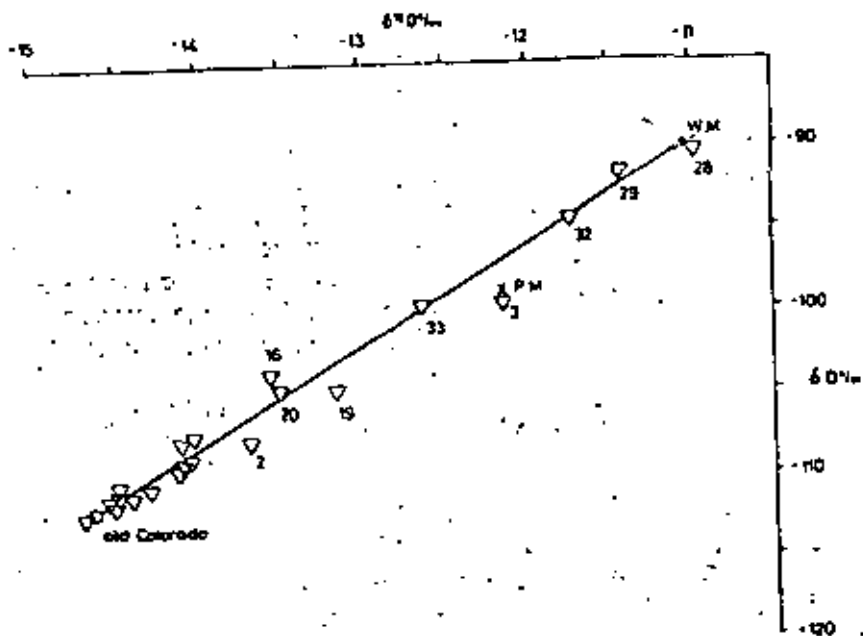


Fig. 3. Stable-isotopic composition of groundwater in the Northeast and East.

crease of chlorinity being due to infiltration of water from the Wellton—Mohawk discharge. Again samples 2, 3 and 19, illustrate the relation with water from the Presa Morelos. A somewhat similar picture is provided by the SO_4^{2-} — $\delta^{18}\text{O}$ plot of Fig. 5. However, it is noted that most of the samples more depleted than -13.5‰ have an excess of sulphate above what can be expected.

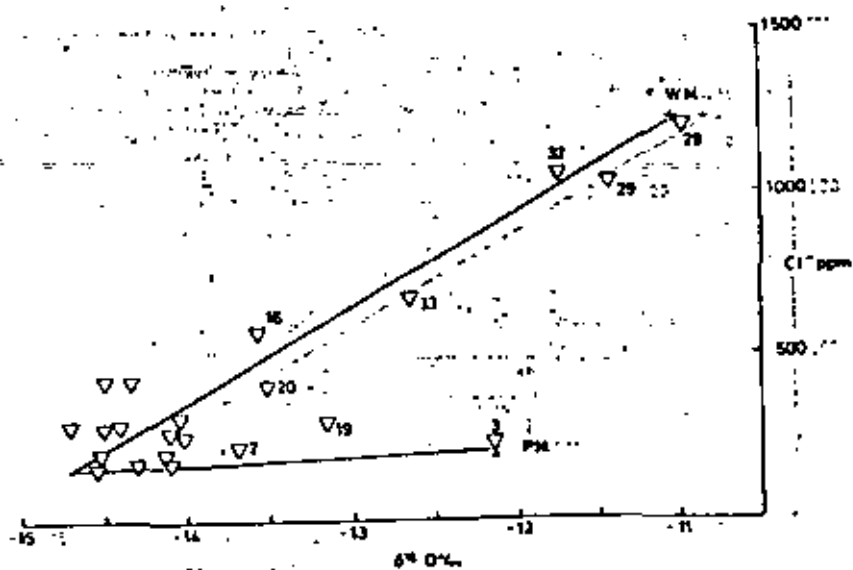


Fig. 4. The Cl^- — $\delta^{18}\text{O}$ relationship of groundwater in the Northeast and East.

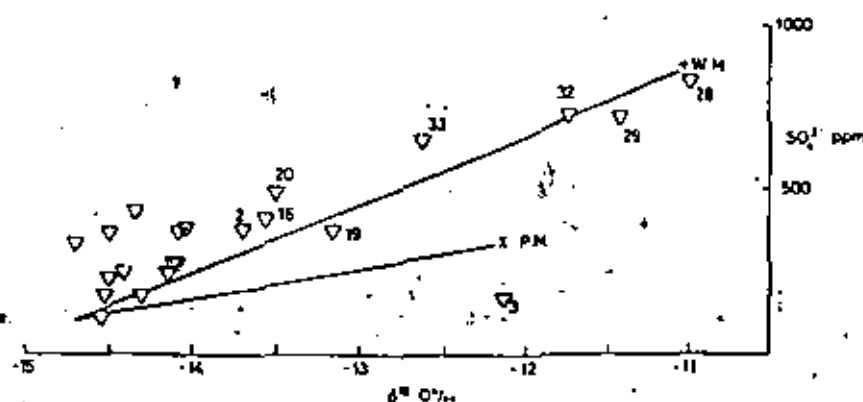


Fig. 5. The SO_4^{2-} - $\delta^{18}\text{O}$ relationship of groundwater in the Northeast and East.

by a simple mixing process between "old" Colorado River and Presa Morelos or Wellton-Mohawk Drain. This suggests that while the increase in salinity is mainly due to infiltration of surface water of poor quality, the samples less affected by mixture have an excess of sulphate due to dissolution of evaporitic deposits.

The Northwest and West

A partial correlation coefficient matrix was computed for the samples in this area (Table III). Analysis of variance shows that at the 99% confidence level the coefficients less than 0.52 are not significant.

In comparison to the previous area, the coefficient for $(\delta^{18}\text{O} + \delta\text{D})$ is somewhat lower but still highly significant, which would support the hypothesis of infiltration from the surface-water system. The linear regression (2) computed for the groundwater samples in this area fits perfectly on a mixing line between the indices for "old" Colorado River and Presa Morelos water (Fig. 6).

TABLE III

Partial correlation coefficient matrix for groundwater samples in the Northwest and West

	$\delta^{18}\text{O}$	δD	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^{+} + \text{Cl}^{-}$	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}
$\delta^{18}\text{O}$	1	0.92	0.69	0.14	0.62	0.47	0.73
δD		1	0.73	0.35	0.65	0.56	0.76
Ca^{2+}			1	0.67	0.74	0.72	0.91
Mg^{2+}				1	0.50	0.63	0.62
$\text{Na}^{+} + \text{Cl}^{-}$					1	0.94	0.85
SO_4^{2-}						1	0.73
HCO_3^{-}							1

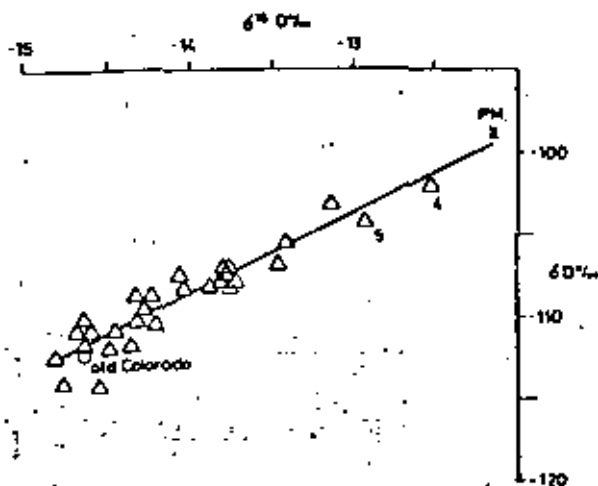


Fig. 6. Stable-isotopic composition of groundwater in the Northwest and West.

$$\delta D = (4.86 \pm 0.35)\delta^{18}O - (40.48 \pm 4.86); \quad r^2 = 0.876 \quad \text{and} \quad s_{y,x} = 1.0 \quad (2)$$

The available tritium data also provide qualitative support for infiltration from the surface-water system. Higher tritium concentrations are measured for samples where the stable-isotope data indicate high proportions of water from Presa Morelos.

On the other hand, the coefficient for $(\delta^{18}O + SO_4^{2-})$ is much lower and that for $(\delta^{18}O + Cl^-)$ is not significant. The lack of correlation between $\delta^{18}O$ and chloride rules out evaporation and mixing with seawater as mechanisms for increase of salinity. Also, in contrast to the previous area, the coefficient for $(Ca^{2+} + SO_4^{2-})$ is higher so that it may be expected that leaching of gypsum may be more important in this area.

The difference in sulphate and chloride behaviour in the two areas is evident from Figs. 7 and 8. In both figures, the mixing lines between "old" Colorado River and Wellton-Mohawk Drain water define the maximum sulphate and chloride concentrations at a given $\delta^{18}O$ value which may be attributed to infiltration from the surface-water system. Although the canals have transported mixtures of water from both Wellton-Mohawk and Presa Morelos, the latter has been the dominant component. Therefore, for all samples except 4 and 5, the increase in salinity must be due to another mechanism than simply infiltration from the surface-water system. The absence of any significant correlation between $\delta^{18}O$ and chloride and the low correlation between $\delta^{18}O$ and sulphate while the $Ca^{2+}-SO_4^{2-}$ correlation is highly significant indicates that dissolution of evaporitic deposits is the important mechanism of salinization of groundwater in this area.

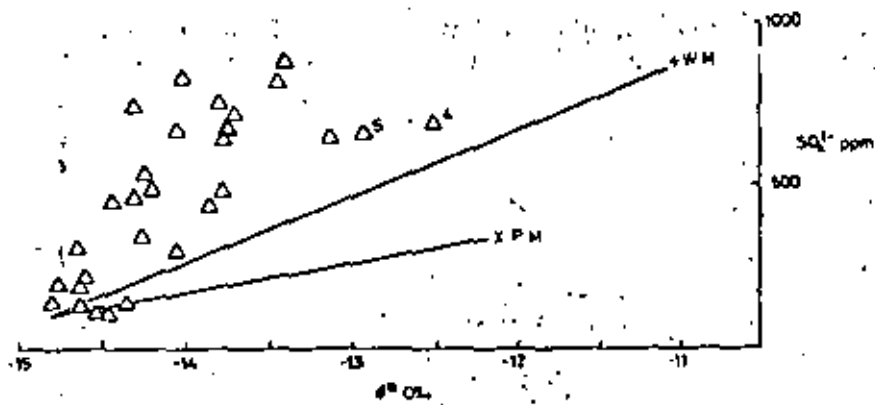


Fig. 7. The SO_4^{2-} - $\delta^{34}\text{S}$ relationship of groundwater in the Northwest and West.

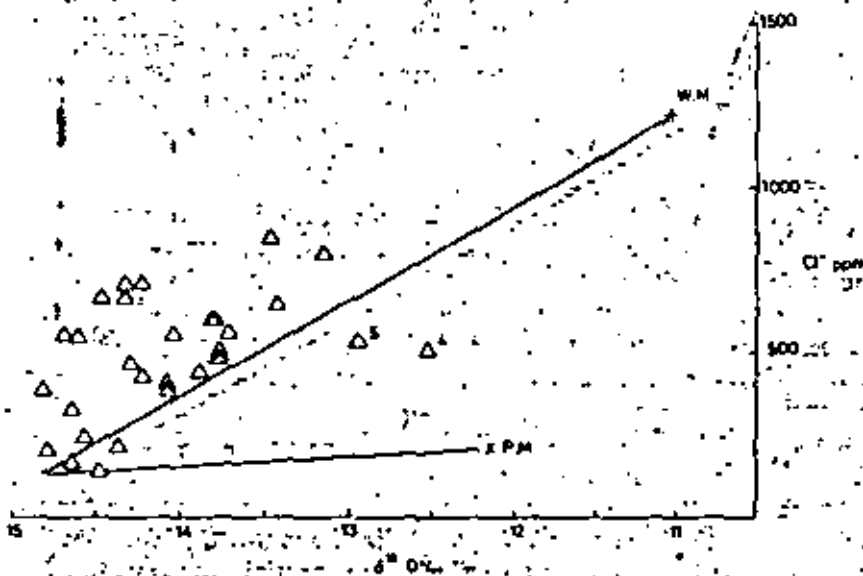


Fig. 8. The Cl^- - $\delta^{34}\text{S}$ relationship of groundwater in the Northwest and West.

The South

Only seven samples are in this group, so it is not meaningful to compute a partial correlation coefficient matrix. The stable-isotopic composition of almost all these samples agrees with the regression line established for wells in the Mesa de San Luis area (Fig. 2). This is to be expected in view of the general direction of flow of groundwater from the Mesa de San Luis to the south. With the exception of sample 38, the low tritium concentrations suggest that a significant mixing with surface water is unlikely. The tritium concentration of sample 38 (16 TU) and its stable-isotopic composition would suggest that mixture with surface water has occurred.

With regard to samples 35, 36 and 37, the increase of chloride concentration is correlated with a decrease in deuterium excess (Fig.9), which suggests that the increase in salinity is due to concentration by partial evaporation. On the basis of the samples in this area, there is no evidence for the presence of seawater.

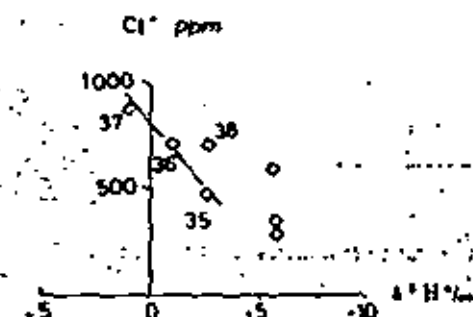


Fig.9. The chloride-deuterium excess of groundwater in the South.

CONCLUSION

On the basis of the samples collected in this investigation, there is no evidence for the salinity being due to partial mixing with seawater. In the North East and East the dominant mechanism of salinization is concluded to be infiltration from the surface-water system, although there is evidence for part of the salinity being derived from dissolution of evaporitic deposits. For the area in the Northwest and West infiltration from the surface-water system has occurred, but dissolution of evaporitic deposits is believed to play an important role in determining the salinity of groundwater. Conclusions on the salinity mechanism in the south of the valley are constrained by the limited number of samples. Only one of the samples provides any evidence for infiltration from the surface-water system, whereas three of the samples suggest that concentration of salts has occurred by partial evaporation of the water.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the collaboration in the field work of the Management of the Irrigation District of the Valley of Mexicali and the Residence of Geohydrology and Arid Zones in Baja California State, S.A.R.H. Appreciation is also expressed to Ignacio Sainz-Ortiz, Rubén Chávez and Antonio Lizt of S.A.R.H. for their comments during the course of the investigation and also to R. Gonsianni of I.A.E.A. for his comments on the manuscript. Enrique García also contributed to the earlier stages of the project.

REFERENCES

- Craig, H., 1966. Isotope composition and origin of the Red Sea and Salton Sea geothermal brines. *Science*, 154: 1544-1548.
- Craig, H., 1969. Source fluids for the Salton Sea geothermal system. *Am. J. Sci.*, 267: 249-255.
- Hely, A., 1969. Lower Colorado River water supply - its magnitude and distribution. U.S. Geol. Surv., Prof. Pap. 486-D.
- I.A.E.A. (International Atomic Energy Agency), 1970, 1971, 1973, 1975. Environmental Isotope Data, Nos. 1-5, I.A.E.A., Vienna, Tech. Rep. Ser. Nos. 96, 117, 129, 147 and 166.
- Irelan, B., 1971. Salinity of surface water in the lower Colorado River-Salton Sea area. U.S. Geol. Surv., Prof. Pap. 486-E.
- Olmsted, F.H., Loeltz, O.J. and Irelan, B., 1973. Geohydrology of the Yuma area, Arizona and California. U.S. Geol. Surv., Prof. Pap. 486-H.
- Palacios-Velez, O., Escamilla, M. and Reyes, A., 1978. El balance de sales del Distrito de Riego de Mexicali, B.C. *Nat. Resour. J.*, 18: 49-68.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1967. Estudio hidrogeológico preliminar de los acuíferos de Mexicali, B.C., y Mesa Arenosa de San Luis, Son. Secr. Recursos Hidrául., México D.F.
- Washington State University, 1972. Hydrological evaluation of the Cerro Prieto geothermal system utilizing isotopic techniques. Wash. State Univ., Pullman, Wash.



centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



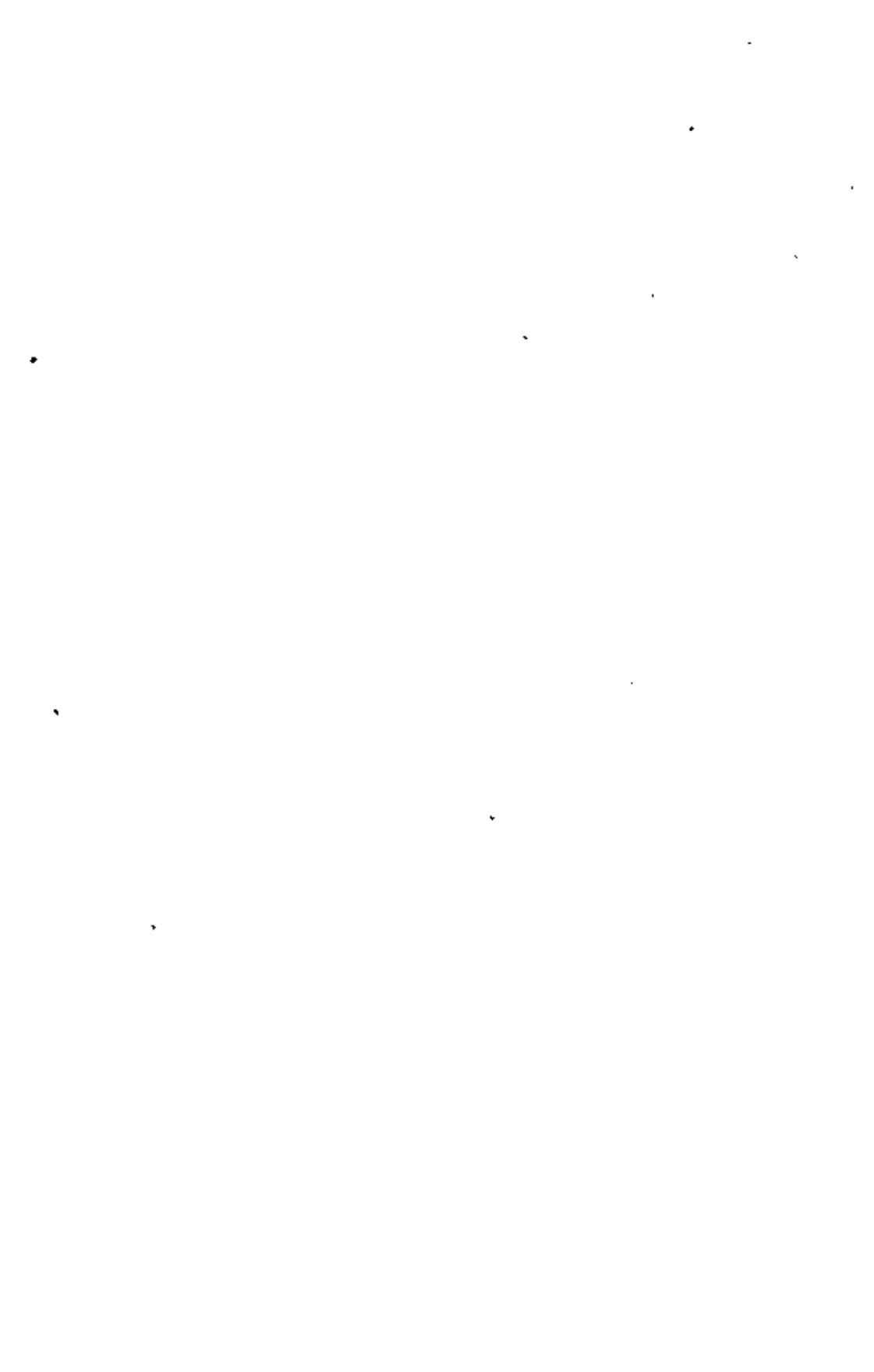
EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS

DE AGUA SUBTERRANEA

MODELOS DE ACUIFEROS

Ing. Salvador Díaz Maldonado

julio, 1980



TEMARIO MODELOS DE ACUIFEROS

1. MODELOS
 - 1.1 Definición de modelo de un acuífero
 - 1.2 Tipos de modelos
 - 1.2.1 Modelos analíticos
 - 1.2.2 Modelos matemáticos
 - 1.2.3 Modelos analógicos
 - 1.3 Proceso de modelación

2. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA POR EL METODO DE DIFERENCIAS FINITAS DESDE EL PUNTO DE VISTA MATEMATICO
 - 2.1 Esquema numérico a partir de la ecuación diferencial de flujo bidimensional
 - 2.1.1 Esquema explícito
 - 2.1.2 Esquema implícito
 - 2.2 Condiciones de frontera
 - 2.2.1 Trazado de la malla
 - 2.2.2 Frontera impermeable
 - 2.2.3 Frontera con carga constante
 - 2.2.4 Frontera con gradiente constante
 - 2.2.5 Estado inicial del acuífero
 - 2.2.6 Niveles definidos en el tiempo

3. METODOS DE SOLUCION
 - 3.1 Método explícito
 - 3.1.1 Planteamiento
 - 3.1.2 Convergencia y estabilidad
 - 3.1.3 Conclusiones
 - 3.2 Métodos implícitos
 - 3.2.1 Planteamiento
 - 3.2.2 Generalidades de algunos métodos implícitos
 - 3.2.3 Comparación entre los distintos métodos

4. DEDUCCION DE LAS ECUACIONES EN DIFERENCIAS FINITAS DESDE EL PUNTO DE VISTA FISICO
 - 4.1 Ecuación de balance

4.2 Método iterativo en sentido alternante (IADI)

4.2.1 Cálculo de los niveles piezométricos con los vectores B y G

5. PROGRAMA BASICO DE SIMULACION DE ACUIFEROS (T.A. PRICKETT Y C.G. LONNQUIST)

5.1 Breve explicación del programa básico de simulación de acuíferos

5.2 Modificaciones del programa básico de simulación de acuíferos

5.2.1 Salida por categorías

5.2.2 Bombeos variables en el tiempo

5.2.3 Condiciones de semiconfinamiento

5.2.4 Recarga inducida

5.2.5 Paso de acuífero confinado a libre

5.2.6 Acuífero libre

5.3 Ejemplos, de cada uno de los casos anteriores, a resolver en clase.

1. MODELOS

1.1 Definición de modelo de un acuífero

Se entiende por modelo de un acuífero el procedimiento que nos permite realizar la simulación del comportamiento dinámico o de la respuesta del acuífero a las diferentes hipótesis de explotación a las que se somete, o sea que podemos conocer las variaciones de los niveles piezométricos del acuífero bajo diferentes políticas de explotación.

Para realizar un modelo se necesita:

- a) La geometría del acuífero
- b) Sus características hidrodinámicas: transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento
- c) Las condiciones de los límites
- d) Las condiciones iniciales, $t = 0$
- e) Las condiciones exteriores que influyen en el sistema

1.2 Tipos de modelos

1.2.1 Modelos analíticos

Son aquellos que dan una solución exacta de la ecuación diferencial. Este tipo de modelo funciona para problemas muy simplificados.

1.2.2 Modelos matemáticos

Son aquellos que utilizan métodos numéricos. Este tipo de modelo es el que apli

caremos usando diferencias finitas.

1.2.3 Modelos analógicos

Son aquellos que usan un fenómeno físico que tenga una ecuación diferencial del mismo tipo que la de los acuíferos.

1.3 Proceso de simulación

El proceso de simulación se explica claramente a sí mismo, figura 1.1

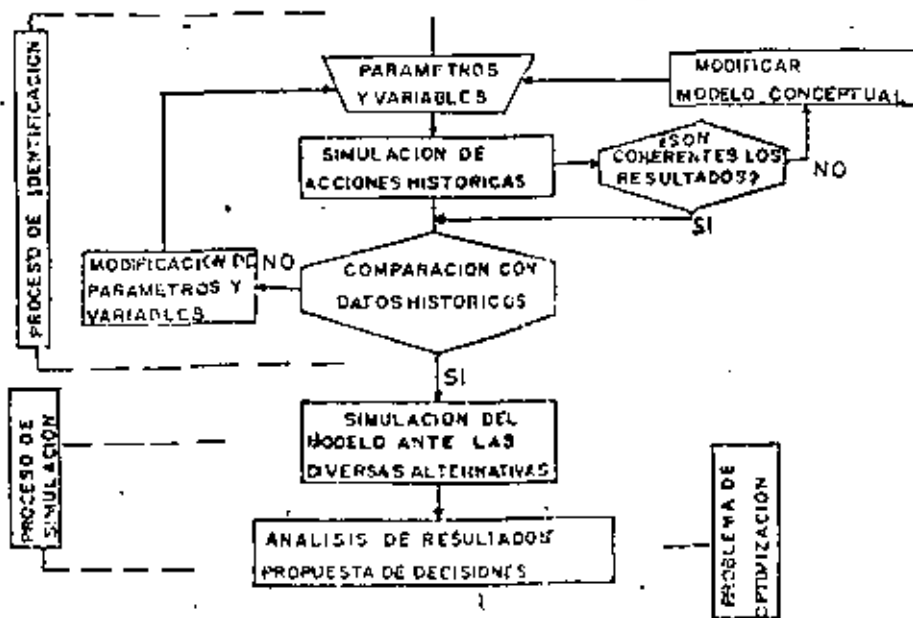


FIG. 1.1

2. PLANTAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA POR EL METODO DE DIFERENCIAS FINITAS DESDE EL PUNTO DE VISTA MATEMATICO

2.1 Esquema numérico a partir de la ecuación diferencial de flujo bidimensional

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial h}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad \dots \quad (2.1)$$

donde:

T = transmisibilidad del acuífero

h = altura piezométrica

t = tiempo

S = coeficiente de almacenamiento

Q = diferencia entre los caudales extraídos y recargados por unidad de área

x,y = coordenadas rectangulares

Efectuando la operación del primer miembro:

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + T_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} + T_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad \dots \quad (2.2)$$

Por medio de series de Taylor desarrollamos el método de diferencias finitas de la siguiente manera:

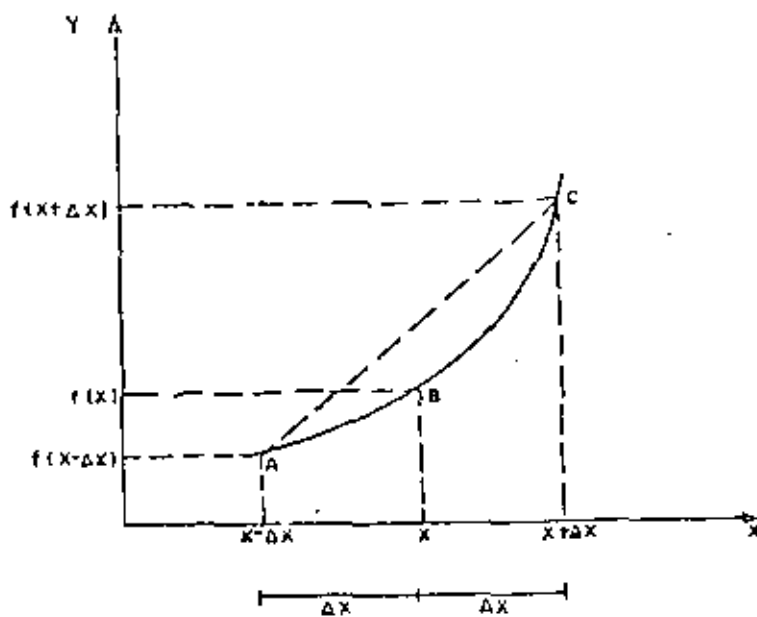


FIGURA 2.1

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \dots + \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{\partial^n f(x)}{\partial x^n} \dots (2.3)$$

$$f(x - \Delta x) = f(x) - \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} - \dots + (-1)^n \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{\partial^n f(x)}{\partial x^n} \dots (2.4)$$

La diferencia hacia adelante, despreciando términos con $n \geq 2$, se obtiene de la ecuación (2.3)

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x}$$

$$\therefore \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \dots (2.5)$$

La diferencia hacia atrás, despreciando términos con $n \geq 2$, se obtiene de la ecuación (2.4)

$$f(x - \Delta x) = f(x) - \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x}$$

$$\therefore \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad (2.6)$$

La diferencia centrada se obtiene restando la ecuación (2.4) de la ecuación (2.3); también despreciando los términos con $n \geq 2$.

$$f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x) = 2 \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x}$$

$$\therefore \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2 \Delta x} \quad (2.7)$$

Para aproximar la segunda derivada sumamos las ecuaciones (2.3) y (2.4) despreciando términos con $n > 2$.

$$f(x + \Delta x) + f(x - \Delta x) = 2f(x) + (\Delta x)^2 \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2}$$

$$\therefore \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} = \frac{f(x - \Delta x) - 2f(x) + f(x + \Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (2.8)$$

Las aproximaciones de las derivadas en función de "y" quedarían en forma similar a las ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.8).

De acuerdo con lo anterior, las expresiones en diferencias finitas en el punto (x, y) son:

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} = \frac{T_x(x + \Delta x, y) - T_x(x - \Delta x, y)}{2\Delta x} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial T_y}{\partial y} = \frac{T_y(x, y + \Delta y) - T_y(x, y - \Delta y)}{2\Delta y} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h(x + \Delta x, y) - h(x - \Delta x, y)}{2\Delta x} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = \frac{h(x, y + \Delta y) - h(x, y - \Delta y)}{2\Delta y} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{h(x - \Delta x, y) - 2h(x, y) + h(x + \Delta x, y)}{(\Delta x)^2} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{h(x, y - \Delta y) - 2h(x, y) + h(x, y + \Delta y)}{(\Delta y)^2} \quad (2.14)$$

Sustituyendo las ecuaciones(2.9) a (2.14) en la ecuación (2.2) obtenemos,

$$\left\{ \frac{T_x(x + \Delta x, y) - T_x(x - \Delta x, y)}{2\Delta x} \right\} \left\{ \frac{h(x + \Delta x, y) - h(x - \Delta x, y)}{2\Delta x} \right\} +$$

$$+ T_x(x,y) \left\{ \frac{h(x-\Delta x,y) - 2h(x,y) + h(x+\Delta x,y)}{(\Delta x)^2} \right\} + \left\{ \frac{T_y(x,y+\Delta y) - T_y(x,y-\Delta y)}{2\Delta y} \right\}$$

$$\left\{ \frac{h(x,y+\Delta y) - h(x,y-\Delta y)}{2\Delta y} \right\} + T_y(x,y) \left\{ \frac{h(x,y-\Delta y) - 2h(x,y) + h(x,y+\Delta y)}{(\Delta y)^2} \right\}$$

$$= S \left\{ \frac{h_{t+\Delta t}(x,y) - h_t(x,y)}{\Delta t} \right\} + Q \dots \dots \dots (2.15)$$

Agrupando términos:

$$- \left\{ \frac{2T_x(x,y)}{(\Delta x)^2} + \frac{2T_y(x,y)}{(\Delta y)^2} \right\} h(x,y) - \left\{ \frac{-T_x(x-\Delta x,y) + T_x(x+\Delta x,y) - 4T_x(x,y)}{4(\Delta x)^2} \right\}$$

$$h(x-\Delta x,y) + \left\{ \frac{T_x(x+\Delta x,y) - T_x(x-\Delta x,y) + 4T_x(x,y)}{4(\Delta x)^2} \right\} h(x+\Delta x,y) -$$

$$- \left\{ \frac{T_y(x,y+\Delta y) - T_y(x,y-\Delta y) - 4T_y(x,y)}{4(\Delta y)^2} \right\} \cdot h(x,y-\Delta y) +$$

$$+ \left\{ \frac{T_y(x,y+\Delta y) - T_y(x,y-\Delta y) + 4T_y(x,y)}{4(\Delta y)^2} \right\} = S \left\{ \frac{h_{t+\Delta t}(x,y) - h_t(x,y)}{\Delta t} \right\} + Q \dots (2.16)$$

donde:

h_t = nivel piezométrico en el instante t

$h_{t+\Delta t}$ = nivel piezométrico en el instante t+Δt

Haciendo:

$$CP = - \left[\frac{2T_x(x,y)}{(\Delta x)^2} + \frac{2T_y(x,y)}{(\Delta y)^2} \right]$$

$$CAX = - \left[\frac{T_x(x+\Delta x,y) - T_x(x-\Delta x,y) - 4T_x(x,y)}{4(\Delta x)^2} \right]$$

$$CPX = \left[\frac{T_x(x+\Delta x,y) - T_x(x-\Delta x,y) + 4T_x(x,y)}{4(\Delta x)^2} \right]$$

$$CAY = - \left[\frac{T_y(x,y+\Delta y) - T_y(x,y-\Delta y) - 4T_y(x,y)}{4(\Delta y)^2} \right]$$

$$CPY = \left[\frac{T_y(x,y+\Delta y) - T_y(x,y-\Delta y) + 4T_y(x,y)}{4(\Delta y)^2} \right]$$

$$h(x,y) = h_{i,j}$$

$$h(x-\Delta x,y) = h_{i-1,j}$$

$$h(x+\Delta x,y) = h_{i+1,j}$$

$$h(x,y-\Delta y) = h_{i,j-1}$$

$$h(x,y+\Delta y) = h_{i,j+1}$$

La ecuación (2.16) queda:

$$\begin{aligned} & CP_{i,j} \cdot h_{i,j} + CAX_{i,j} \cdot h_{i-1,j} + CPX_{i,j} \cdot h_{i+1,j} + CAY_{i,j} \cdot h_{i,j-1} + CPY_{i,j} \cdot h_{i,j+1} = \\ & = S \left[\frac{h_{i,j,\Delta t+t} - h_{i,j,t}}{\Delta t} \right] + Q \dots \dots \dots (2.17) \end{aligned}$$

2.1.1 Esquema explícito

Suponemos que los niveles que aparecen en el primer miembro de la ecuación (2.17) corresponden al instante inicial t , o sea:

$$\begin{aligned}
 & CP_{i,j,t} \cdot h_{i,j,t} + CAX_{i,j} \cdot h_{i-1,j,t} + CPX_{i,j} \cdot h_{i+1,j,t} + CAY_{i,j} \cdot h_{i,j-1,t} + \\
 & + CPY_{i,j} \cdot h_{i,j+1,t} = S \frac{h_{i,j,t+\Delta t}}{\Delta t} - S \frac{h_{i,j,t}}{\Delta t} + Q \dots \dots \dots (2.18)
 \end{aligned}$$

Luego:

$$\begin{aligned}
 h_{i,j,t+\Delta t} = \frac{\Delta t}{S} \cdot \left\{ CP_{i,j} \cdot h_{i,j,t} + CAX_{i,j} \cdot h_{i-1,j,t} + CPX_{i,j} \cdot h_{i+1,j,t} + \right. \\
 \left. + CAY_{i,j} \cdot h_{i,j-1,t} + CPY_{i,j} \cdot h_{i,j+1,t} \right\} + h_{i,j,t} - \frac{\Delta t}{S} Q \dots \dots (2.18')
 \end{aligned}$$

Entonces, como se puede ver de la ecuación (2.18'), teniendo conocidos los niveles en el instante inicial t podemos conocer los del instante $t+\Delta t$.

2.1.2 Esquema implícito

Aquí se supone que los niveles que aparecen en el primer miembro de la ecuación (2.17) corresponden al instante $t+\Delta t$, entonces

$$\begin{aligned}
 & CP_{i,j} \cdot h_{i,j,t+\Delta t} + CAX_{i,j} \cdot h_{i-1,j,t+\Delta t} + CPX_{i,j} \cdot h_{i+1,j,t+\Delta t} + \\
 & + CAY_{i,j} \cdot h_{i,j-1,t+\Delta t} + CPY_{i,j} \cdot h_{i,j+1,t+\Delta t} = S \frac{h_{i,j,t+\Delta t}}{\Delta t} - S \frac{h_{i,j,t}}{\Delta t} + Q
 \end{aligned}$$

Haciendo

$$CP = CP - \frac{S}{\Delta t}$$

$$CTI = Q - S \frac{h_{i,j,t}}{\Delta t}$$

Luego:

$$\begin{aligned}
 & CP_{i,j} \cdot h_{i,j,t+\Delta t} + CAX_{i,j} \cdot h_{i-1,j,t+\Delta t} + CPX_{i,j} \cdot h_{i+1,j,t+\Delta t} + \\
 & CAY_{i,j} \cdot h_{i,j-1,t+\Delta t} + CPY_{i,j} \cdot h_{i,j+1,t+\Delta t} = CTI \quad \dots \quad (2.19)
 \end{aligned}$$

Como se puede observar de la ecuación(2.19), para resolver un esquema implícito se debe utilizar algún método matricial.

2.2 Condiciones de frontera

2.2.1 Trazado de la malla

Existen varios tipos de malla como la rectangular constante y variable y la poligonal regular e irregular; para nuestro estudio usaremos la rectangular. Para el acuífero podemos usar una malla rectangular constante y en partes donde hay fuerte bombeo o en las fronteras irregulares usaremos la rectangular variable.

2.2.2 Frontera impermeable

Como sabemos no existe flujo a través de una frontera impermeable. Entonces, de la ley de Darcy

$$Q_x = -T_x \frac{\partial h}{\partial x} \Delta y$$

podemos hacer la transmisibilidad o el gradiente nulos y el gasto Q será igual a cero.

2.2.3 Frontera con carga constante

Este tipo de frontera se presenta cuando tenemos grandes masas de agua como ríos, embalses, lagos o el mar, en los cuales tenemos abatimientos despreciables. En la figura 2.2 podemos notar que la masa de agua debe penetrar totalmente en el acuífero.

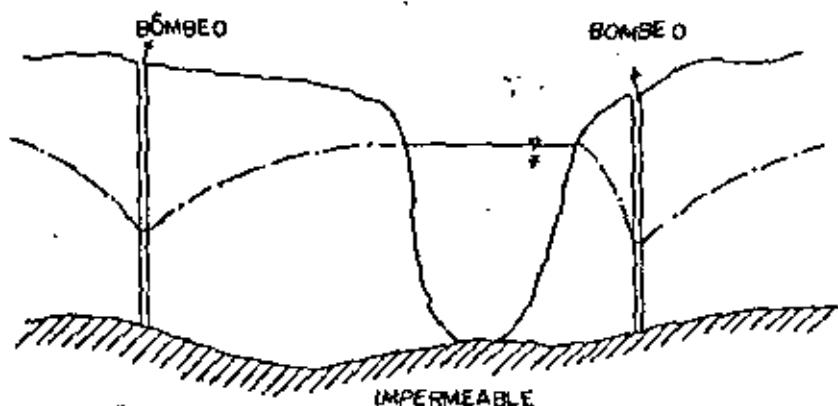


FIG2.2

En nuestro caso consideremos un coeficiente de almacenamiento muy grande, en los nudos que interesa la frontera tratada para que no varíe el nivel, ya que todo el flujo, negativo o positivo, lo absorberá el almacenamiento.

2.2.4 Frontera con gradiente constante

Este tipo de frontera se utiliza cuando no podemos simular todo nuestro acuífero, entonces usamos el gradiente deseado a los nudos de la frontera. Si tenemos un acuífero confinado solamente fijaremos el gasto ya que la transmisibilidad es constante. Para acuíferos libres se complica el problema ya que el gasto varía con el nivel.

2.2.5 Estado inicial del acuífero

Para resolver la ecuación de flujo en cada elemento, intervalo por intervalo, hay que conocer la situación inicial de los niveles del acuífero.

2.2.6 Niveles definidos en el tiempo

Es cuando una frontera con carga constante (embalse, río, etc.) varía su nivel de intervalo a intervalo según una ley fija e independiente del estado del acuífero.

3. MÉTODOS DE SOLUCION

3.1 Método explícito

3.1.1 Planteamiento

Suprimiendo los coeficientes en la ecuación (2.18) tenemos que:

$$(\Delta^2 h)_t = \frac{h_{t+\Delta t} - h_t}{\Delta t} \quad (3.1)$$

donde $(\Delta^2 h)_t$ representa la forma en diferencias finitas de

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) =$$

Luego, de la ecuación (3.1) queda:

$$h_{t+\Delta t} = h_t + \Delta t (\Delta^2 h)_t \quad (3.2)$$

El proceso de cálculo sería:

1. Definición de los coeficientes de cada ecuación (transmisibilidades, almacenamiento, etc.)
2. Definición de los niveles iniciales en cada nudo, h_0
3. Con la ecuación (3.2) y los niveles h_0 , cálculo de los niveles en el instante Δt , h_1

4. Cálculo de los nuevos coeficientes si es que se trata de un acuífero libre en que la transmisibilidad depende del nivel freático
5. Repetir las fases 3 y 4 para sucesivos Δt , hasta llegar a obtener la solución en el instante deseado.

3.1.2 Convergencia y estabilidad

Como sabemos, debemos tener un valor límite de Δt para que el método sea convergente. Además debe evitarse que el error sea acumulativo, es decir, que el método sea estable. En el método explícito la condición de convergencia es igual a la de estabilidad, y en el caso más general se expresa:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y} < \frac{S_{i,j}}{T_{i-1,j} + T_{i+1,j} + T_{i,j-1} + T_{i,j+1}} \quad (3.3)$$

Si el acuífero es homogéneo e isótropo la ecuación (3.3) se expresa

$$\frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y} < \frac{S}{4T} \quad (3.4)$$

3.1.3 Conclusiones

- a) El método explícito es fácil de aplicar ya que no implica tener que resolver un sistema de ecuaciones.
- b) La gran desventaja de este método es que para que sea estable y convergente se debe tener un Δt demasiado pequeño lo que lo hace ineficiente para usarlo en la práctica.

3.2 Métodos implícitos

3.2.1 Planteamiento

Como se dijo anteriormente el método implícito plantea la ecuación para $t + \Delta t$,

$$(\Delta^2 h)_{t+\Delta t} = \frac{h_{t+\Delta t} - h_t}{\Delta t} \quad (3.5)$$

Al obtener un sistema de ecuaciones, debemos usar algún método matricial. Existe una gran variedad de estos métodos, aquí solo mencionaremos los más utilizados en modelos de acuíferos.

3.2.2 Generalidades de algunos métodos implícitos

3.2.2.1 Método de relajación

Estos métodos son aquellos que parten de un valor inicial supuesto, y por tanteos sucesivos llegan a la solución con cierto error admisible.

Existen diferentes tipos de métodos implícitos como el de Southwell, Jacobi, Gauss-Seidel, Sobrerrelajación puntual, sobrerrelajación lineal, ADI, IADI, etc.

El de Gauss-Seidel es parecido al de Jacobi con la única diferencia de que el primero es más rápido ya que utiliza los últimos valores de los calculados. O sea, al calcular h_i en la iteración $m+1$ todavía no se conocen los valores nuevos de h_2, h_3, \dots, h_n , y por lo tanto, se utilizan los viejos. En resumen, al calcular h_i se emplean los valores nuevos de h_1, h_2, \dots, h_{i-1} y los viejos $h_{i+1}, h_{i+2}, \dots, h_n$. Con este sistema la velocidad de convergencia se duplica.

Los métodos de sobrerrelajación puntual y lineal son más rápidos que el de Gauss-Seidel, ya que utilizan un parámetro de aceleración. Esto es, dicho parámetro se usa para que los valores anteriores se acerquen más a los nuevos y así se aumenta la velocidad de convergencia.

Ultimamente uno de los métodos más usados en modelos de acuíferos es el IADI, el cual se diferencia del ADI en los siguientes puntos.

1. Cada dos rastreos de la matriz no completan un intervalo de tiempo, sino que completan una iteración. Esto permite variar progresivamente la transmisibilidad en función del nivel obtenido en cada iteración, por lo cual puede aplicarse a problemas no lineales que se presentan al tratar acuíferos libres.
2. Se considera terminado el cálculo del intervalo cuando el error es aceptable, según un criterio prefijado.
3. Para mejorar la eficiencia del proceso iterativo se incluye una serie de parámetros de aceleración (números positivos y reales).

En el siguiente capítulo se desarrollará más este método.

3.2.3 Comparación entre los distintos métodos

La tabla 3.1 da una idea de las características de cada método.

Método	Carácter	Rapidez	Almacenamiento	Convergencia y estabilidad	Problemas no lineales	Observaciones
Gauss	Directo	Lento	Mucho	Bien	No	Bueno para menos de 100 ecuaciones. Seguro.
Jordan	Directo	Lento	Mucho	Bien	No	Idea.
Explicito	Directo	Muy rápido	Poco	Problemas	No	Exige Δt pequeño.
Southwell	Iterativo	Normal	Poco	Bien	Si	Fácil de programar.
Jacobi	Iterativo	Algo lento	Normal	Bien	Si	Antiguado. No se usa.
Gauss-Seidel	Iterativo	Normal	Poco	Bien	Si	Fácil de programar.
S. O. R.	Iterativo	Rápido	Poco	Bien	Si	Muy rápido con ω óptima.
S. O. R. por filas	Iterativo	Rápido	Poco	Bien	Si	Bueno con acúferos alargados.
S. O. R. simétrico	Iterativo	Rápido	Poco	Bien	Si	Repara errores residuales.
A. D. I.	Directo	Muy rápido	Poco	Problemas	No	Exige malla con contorno exterior rectangular. (Matriz regular.)
J. A. D. I.	Iterativo	El más rápido	Poco	Bien	Si	Con serie de parámetros, muy rápido. (Matriz regular.)

TABLA 3.1

4. DEDUCCION DE LAS ECUACIONES EN DIFERENCIAS FINITAS DESDE EL PUNTO DE VISTA FISICO

4.1 Ecuación de balance

Como sabemos la ecuación diferencial que describe el flujo bidimensional en régimen transitorio, en un acuífero confinado, heterogéneo y anisótropo es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad \dots \quad (4.1)$$

No existe solución general para la ecuación (4.1) por lo que la plantearemos en diferencias finitas desde el punto de vista físico.

Tomemos la figura 4.1 como referencia,

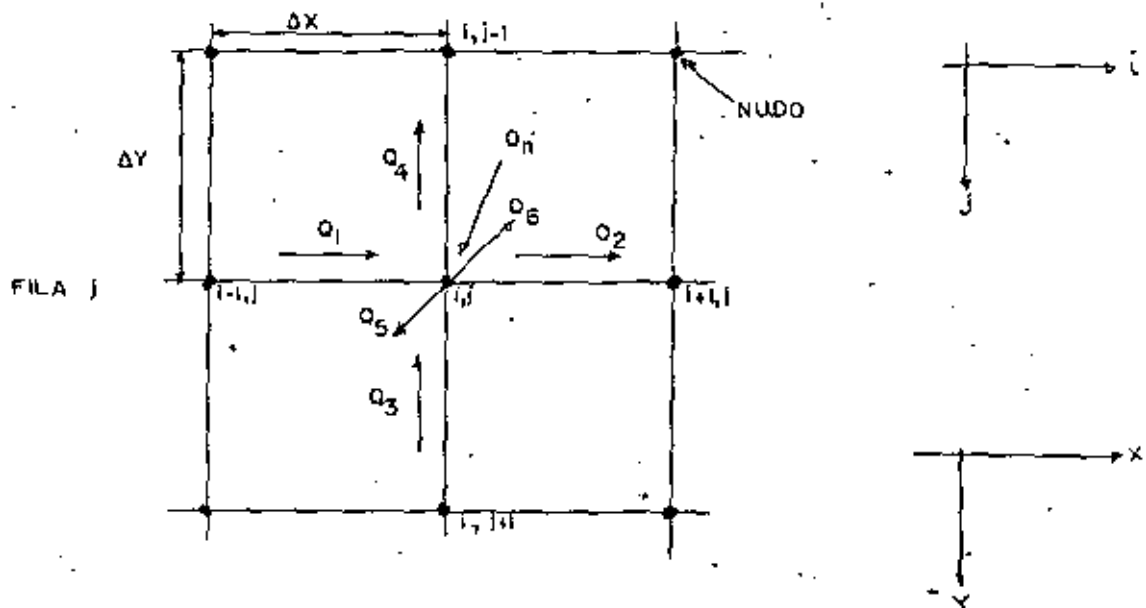


FIGURA 4.1

Como se muestra se han escogido convencionalmente las direcciones del flujo, donde:

Q_1, Q_2, Q_3 y Q_4 = transferencias de agua de un nudo a otro.

Q_5 = cantidad de agua incorporada o liberada del almacenamiento del acuífero por unidad de área. Se conviene considerarlo positivo cuando se libera.

Q_6 = caudal constante de bombeo

Q_n = otras acciones especiales como infiltración inducida, evapotranspiración, aportaciones de otros acuíferos, etc.

Estableciendo la ecuación de balance en el nudo i, j de la figura 4.1 tenemos que:

$$Q_n + Q_1 + Q_3 = Q_2 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \dots \dots \dots (4.2)$$

Las proyecciones horizontales de los volúmenes orientados que intervienen en los términos de la ecuación (4.2) (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) se definen como se muestra en la figura 4.2.

Aplicando la ley de Darcy se obtienen las ecuaciones

$$Q_1 = -T_{i-1,j,2} (h_{i-1,j} - h_{i,j}) \Delta y / \Delta x \dots \dots \dots (4.3.a)$$

$$Q_2 = T_{i,j,2} (h_{i,j} - h_{i+1,j}) \Delta y / \Delta x \dots \dots \dots (4.3.b)$$

$$Q_3 = T_{i,j,1} (h_{i,j+1} - h_{i,j}) \Delta x / \Delta y \dots \dots \dots (4.3.c)$$

$$Q_4 = T_{i,j-1,1} (h_{i,j} - h_{i,j-1}) \Delta x / \Delta y \dots \dots \dots (4.3.d)$$

donde:

$T_{i,j,1}$ = Transmisibilidad del acuífero en el volumen orientado comprendido entre los nudos i, j e $i, j+1$ (figura 4.2.c-d)

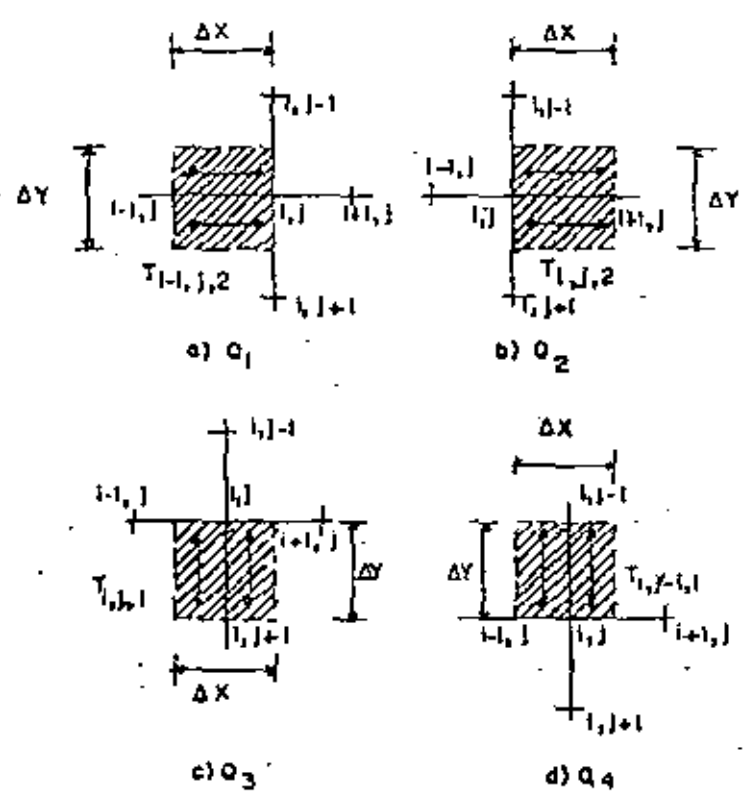


FIGURA 4.2

$T_{i,j,2}$ = transmisibilidad del acuífero en el volumen orientado comprendido entre los nudos i,j e $i+1,j$ (figura 4.2.a-b)

$h_{i,j}$ = altura piezométrica calculada al final del incremento de tiempo, medida a partir de un nivel de referencia arbitrario, en el nudo i,j .

En la figura 4.3 se muestran los volúmenes orientados para Q_5 , Q_6 y Q_n .

Entonces, Q_5 está dado por:

$$Q_5 = S\Delta x\Delta y (h_{i,j} - h\phi_{i,j})/\Delta t \quad (4.4)$$

donde:

$h\phi_{i,j}$ = altura piezométrica calculada en el nudo al final del intervalo de tiempo anterior.

Y como dijimos Q_6 es el caudal constante de bombeo

$$Q_6 = Q_{i,j} \quad (4.5)$$

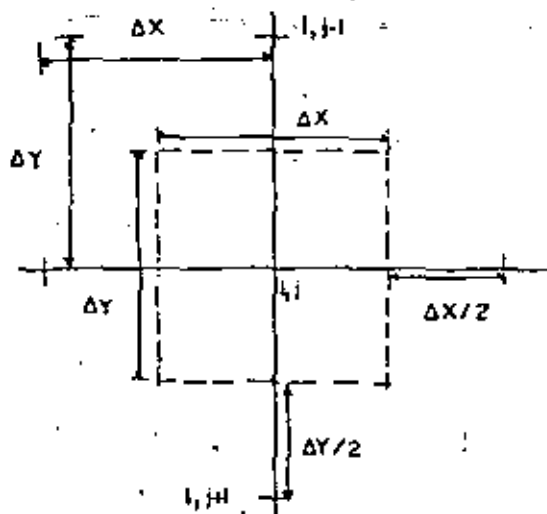


FIGURA 4.3

A pesar de que no tomaremos en cuenta otros efectos especiales incluiremos dicho término para si es necesario

$$Q_n = Q_n \dots \dots \dots (4.6)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.3.a) a (4.6), en la ecuación (4.2) tenemos que

$$\begin{aligned} Q_n + T_{i-1,j,2} (h_{i-1,j} - h_{i,j}) \Delta y / \Delta x + T_{i,j,1} (h_{i,j+1} - h_{i,j}) \Delta x / \Delta y = \\ = T_{i,j,2} (h_{i,j} - h_{i+1,j}) \Delta y / \Delta x + T_{i,j-1,1} (h_{i,j} - h_{i,j-1}) \Delta x / \Delta y + S \Delta x \Delta y (h_{i,j} - h_{i,j}^0) \\ / \Delta t + Q_{i,j} \dots \dots \dots (4.7) \end{aligned}$$

Dividiendo entre $\Delta x \Delta y$ y ordenando queda:

$$\begin{aligned} T_{i-1,j,2} (h_{i-1,j} - h_{i,j}) / \Delta x^2 + T_{i,j,2} (h_{i+1,j} - h_{i,j}) / \Delta x^2 + T_{i,j,1} (h_{i,j+1} - h_{i,j}) \\ / \Delta y^2 + T_{i,j-1,1} (h_{i,j-1} - h_{i,j}) / \Delta y^2 = S (h_{i,j} - h_{i,j}^0) / \Delta t + Q_{i,j} / \Delta x \Delta y - Q_n / \Delta x \Delta y \quad (4.8) \end{aligned}$$

4.2 Método iterativo implícito en dirección alternante (IADI)

Este método consiste en resolver un sistema de ecuaciones primero por cada columna, es decir, mantenemos constantes las alturas piezométricas de las otras columnas mientras resolvemos para la columna que nos interesa, así hasta terminar, luego hacemos lo mismo para las filas. El sistema de ecuaciones resultante para cada fila y cada columna, lo resolvemos por el método de eliminación de Gauss. Se concluye una iteración cuando se procesan las columnas y las fi-

las, luego se compara con el error de convergencia deseado, si no se satisface se procede a otra iteración, cuando el error se satisface se han encontrado las alturas piezométricas para ese intervalo de tiempo. Según Peaceman y Rachford (1955) indican que esta técnica es estable incondicionalmente, con independencia del valor asignado al incremento de tiempo.

La ecuación (4.8) se puede reacomodar para resolver por columnas y por filas. Por sencillez supondremos $\Delta x = \Delta y$, entonces la ecuación (4.8) se puede escribir, multiplicando por $(\Delta x)^2$:

$$T_{i-1,j,2} (h_{i-1,j} - h_{i,j}) + T_{i,j,2} (h_{i+1,j} - h_{i,j}) + T_{i,j,1} (h_{i,j+1} - h_{i,j}) + T_{i,j-1,1} (h_{i,j-1} - h_{i,j}) = (S\Delta x^2/\Delta t)(h_{i,j} - h_{i,j}^\phi) + Q_{i,j} - Q_{i,j} - Q_n \quad (4.9)$$

La ecuación (4.9) se puede reordenar de la siguiente manera:

$$h_{i,j} (T_{i-1,j,2} + T_{i,j,2} + T_{i,j,1} + T_{i,j-1,1} + S\Delta x^2/\Delta t) - T_{i-1,j,2} \cdot h_{i-1,j} - T_{i,j,2} \cdot h_{i+1,j} - T_{i,j,1} \cdot h_{i,j+1} - T_{i,j-1,1} \cdot h_{i,j-1} = (S\Delta x^2/\Delta t) h_{i,j}^\phi - Q_{i,j} + Q_n \quad (4.10)$$

Para el cálculo por columnas la ecuación (4.10) se puede escribir:

$$- T_{i,j-1,1} \cdot h_{i,j-1} + h_{i,j} (T_{i-1,j,2} + T_{i,j,2} + T_{i,j,1} + T_{i,j-1,1} + S\Delta x^2/\Delta t) - T_{i,j,1} \cdot h_{i,j+1} = (S\Delta x^2/\Delta t) h_{i,j}^\phi - Q_{i,j} + T_{i-1,j,2} \cdot h_{i-1,j} + T_{i,j,2} \cdot h_{i+1,j} + Q_n \quad (4.11)$$

Como podemos ver la ecuación (4.11) es de la forma.

$$AA_j \cdot h_{i,j-1} + BB_j \cdot h_{i,j} + CC_j \cdot h_{i,j+1} = DD_j \dots \dots \dots (4.12)$$

donde:

$$AA_j = -T_{i,j-1,1}$$

$$BB_j = T_{i-1,j,2} + T_{i,j,2} + T_{i,j,1} + T_{i,j-1,1} + S\Delta x^2/\Delta t$$

$$CC_j = -T_{i,j,1}$$

$$DD_j = (S\Delta x^2/\Delta t) h\phi_{i,j} - Q_{i,j} + T_{i-1,j,2} \cdot h_{i-1,j} + T_{i,j,2} \cdot h_{i+1,j} + Q_n$$

Y para el cálculo por filas la ecuación (4.10) quedaría:

$$-T_{i+1,j,2} \cdot h_{i-1,j} + h_{i,j} (T_{i-1,j,2} + T_{i,j,2} + T_{i,j,1} + T_{i,j-1,1} + S\Delta x^2/\Delta t) -$$

$$-T_{i,j,2} \cdot h_{i+1,j} = (S\Delta x^2/\Delta t)h\phi_{i,j} - Q_{i,j} + T_{i,j-1,1} \cdot h_{i,j-1} + T_{i,j,1} \cdot h_{i,j+1} + Q_n \quad (4.13)$$

La ecuación (4.13) es de la forma

$$AA_i \cdot h_{i-1,j} + BB_i \cdot h_{i,j} + CC_i \cdot h_{i+1,j} = DD_i \dots \dots \dots (4.14)$$

donde:

$$AA_i = -T_{i-1,j,2}$$

$$BB_i = T_{i-1,j,2} + T_{i,j,2} + T_{i,j,1} + T_{i,j-1,1} + S\Delta x^2/\Delta t$$

$$CC_i = -T_{i,j,2}$$

$$DD_i = (S\Delta x^2/\Delta t) \cdot h\phi_{i,j} - Q_{i,j} + T_{i,j-1,1} \cdot h_{i,j-1} + T_{i,j,1} \cdot h_{i,j+1} + Q_n$$

Como vemos, si escribimos un sistema de ecuaciones con las ecuaciones (4.12) y (4.14), es decir, un sistema para columnas y otro para filas, en notación matricial nos quedará una matriz tridiagonal, que es la que generalmente obtenemos en el sistema de un acuífero.

4.2.1 Cálculo de niveles piezométricos con los vectores G y B.

		Columnas			
		i=1	2	3	4
j-1		o	o	o	o
Fila j	→	i=1	2	3	4
		•	•	•	•
j+1		i=1	2	3	4
		o	o	o	o

FIGURA 4.4

Las ecuaciones para los nudos de la fila j quedan como sigue:

$$AA_1 \cdot h_{0,j} + BB_1 \cdot h_{i,j} + CC_1 \cdot h_{2,j} = DD_1$$

Como no existe ningún nudo de coordenadas 0,j hacemos $AA_1 = 0$, entonces

$$BB_1 \cdot h_{i,j} + CC_1 \cdot h_{2,j} = DD_1$$

o sea:

$$h_{i,j} = (DD_1/BB_1) - (CC_1/BB_1) \cdot h_{2,j} \dots \dots \dots (4.15)$$

Haremos:

$$G_1 = DD_1/BB_1$$

$$B_1 = CC_1/BB_1$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación (4.15) queda:

$$h_{i,j} = G_1 - B_1 \cdot h_{2,j} \dots \dots \dots (4.16)$$

Haciendo lo mismo para la columna $i=2$ y la fila j tenemos que:

$$AA_2 \cdot h_{i,j} + BB_2 \cdot h_{2,j} + CC_2 \cdot h_{3,j} = DD_2$$

Despejando de la ecuación anterior $BB_2 \cdot h_{2,j}$ queda:

$$BB_2 \cdot h_{2,j} = DD_2 - CC_2 \cdot h_{3,j} - AA_2 \cdot h_{1,j}$$

sustituyendo la ecuación (4.16) en la ecuación anterior tenemos que:

$$BB_2 \cdot h_{2,j} = DD_2 - CC_2 \cdot h_{3,j} - AA_2 (G_1 - B_1 \cdot h_{2,j})$$

Ahora despejamos $h_{2,j}$ y reacomodamos

$$h_{2,j} = \left\{ (DD_2 - AA_2 \cdot G_1) / (BB_2 - AA_2 \cdot B_1) \right\} - \left\{ CC_2 / (BB_2 - AA_2 \cdot B_1) \right\} h_{3,j} \dots (4.17)$$

Hacemos

$$G_2 = (DD_2 - AA_2 \cdot G_1)/(BB_2 - AA_2 \cdot B_1)$$

$$B_2 = CC_2/(BB_2 - AA_2 \cdot B_1)$$

Y la ecuación (4.17) queda:

$$h_{2,j} = G_2 - B_2 \cdot h_{3,j} \dots \dots \dots (4.18)$$

Para la fila j e $i=3$ tenemos que:

$$AA_3 \cdot h_{2,j} + BB_3 \cdot h_{3,j} + CC_3 \cdot h_{4,j} = DD_3$$

Despejamos $BB_3 \cdot h_{3,j}$ y queda:

$$BB_3 \cdot h_{3,j} = DD_3 - CC_3 \cdot h_{4,j} - AA_3 \cdot h_{2,j}$$

Sustituyendo la ecuación (4.18) en la ecuación anterior y despejando $h_{3,j}$ obtenemos

$$h_{3,j} = \left[(DD_3 - AA_3 \cdot G_2)/(BB_3 - AA_3 \cdot B_2) \right] - \left[CC_3/(BB_3 - AA_3 \cdot B_2) \right] h_{4,j} \quad (4.19)$$

Luego

$$G_3 = (DD_3 - AA_3 \cdot G_2)/(BB_3 - AA_3 \cdot B_2)$$

$$B_3 = CC_3/(BB_3 - AA_3 \cdot B_2)$$

Por lo que la ecuación (4.19) quedará

$$h_{3,j} = G_3 - B_3 \cdot h_{4,j} \dots \dots \dots (4.20)$$

Finalmente para la fila j e $i=4$ tenemos que:

$$AA_4 \cdot h_{3,j} + BB_4 \cdot h_{4,j} + CC_4 \cdot h_{5,j} = DD_4$$

Hacemos $CC_4 = 0$ ya que no existe nudo $5,j$, luego

$$AA_4 \cdot h_{3,j} + BB_4 \cdot h_{4,j} = DD_4 \dots \dots \dots (4.21)$$

Despejando $BB_4 \cdot h_{4,j}$ queda:

$$BB_4 \cdot h_{4,j} = DD_4 - AA_4 \cdot h_{3,j}$$

Sustituyendo la ecuación (4.20) en la ecuación anterior y despejando $h_{4,j}$:

$$h_{4,j} = (DD_4 - AA_4 \cdot G_3) / (BB_4 - AA_4 \cdot B_3) \dots \dots \dots (4.22)$$

Luego hacemos

$$G_4 = (DD_4 - AA_4 \cdot G_3) / (BB_4 - AA_4 \cdot B_3)$$

Por lo que la ecuación (4.22) queda

$$h_{4,j} = G_4 \dots \dots \dots (4.23)$$

Entonces con la ecuación (4.23) conocemos $h_{4,j}$, luego con la ecuación (4.20) podemos conocer $h_{3,j}$, con la ecuación (4.18) conocemos $h_{2,j}$ y con la ecuación (4.16) conocemos $h_{1,j}$. O sea, hemos conocido todos los niveles piezométricos de la fila j .

5. PROGRAMA BASICO DE SIMULACION DE ACUIFEROS

5.1 Breve explicación del programa básico de simulación de acuíferos

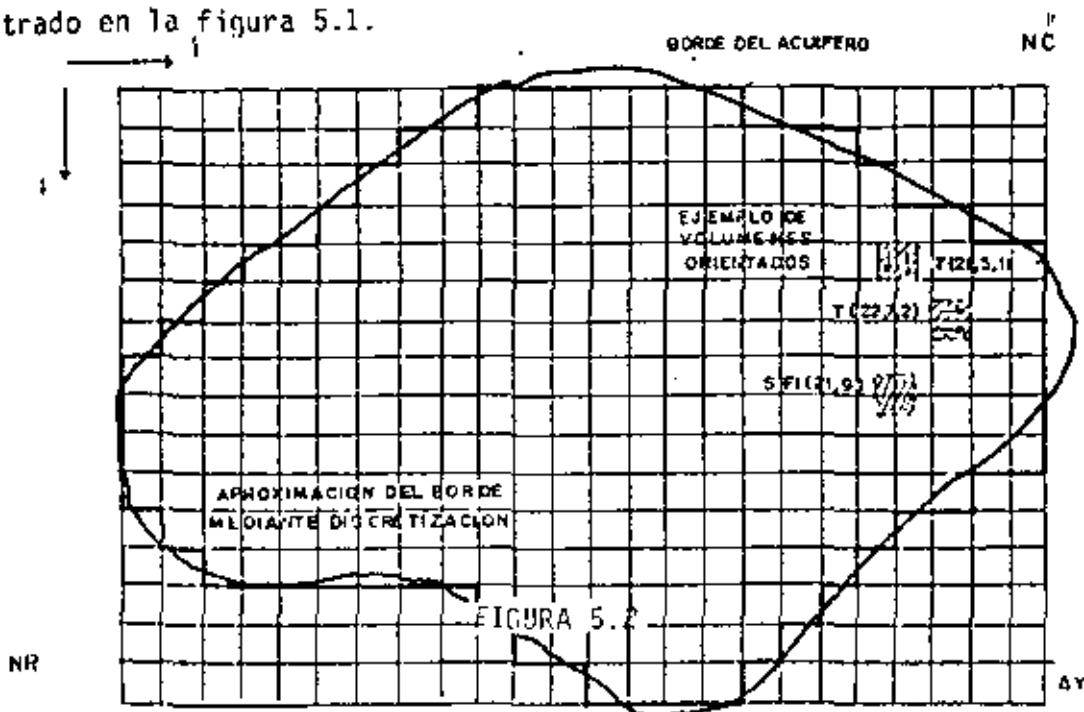
En la figura 5.1 se muestra el listado del programa básico de simulación de acuíferos. Dicho programa lo podemos dividir en tres partes: lectura de datos, simulación e impresión de resultados. Antes de seguir adelante conviene definir lo que es el factor de almacenamiento.

$$SFI_{i,j} = S \Delta x \Delta y \dots \dots \dots (5.1)$$

donde:

- $SFI_{i,j}$ = factor de almacenamiento para el nudo i,j , en m^3/m
- S = coeficiente de almacenamiento del acuífero en condiciones de confinamiento, adimensional
- $\Delta x, \Delta y$ = dimensiones de la malla, en metros

Ya que tenemos discretizado nuestro acuífero, figura 5.2, procedemos a meter los datos a nuestro programa como se muestra en la figura 5.3 y con el formato mostrado en la figura 5.1.



		PROGRAMA FOLIO 1001-1010 (CONTINUA)	078011
		C. ILLINOIS STATE WATER SURVEY	
		C. UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA Y MEJORA RAZA	
		C. DEFINICION DE VARIABLES	
		C. NIVELES METEOROLOGICOS INICIALES	
		EN EL MOMENTO (C)	
		C. NIVELES METEOROLOGICOS AL FINAL DEL	
		PERIODO DE TIEMPO (C)	
10		C. BILIO (C) - PERIODO DE MANTENIMIENTO PARA	
		CONDICIONES DE CONTINUIDAD (C)	
		C. GRUPOS DE DATOS CONSTANTES (C)	
		C. TRANSMISIBILIDAD DEL AGUERO ENTRE	
		LOS AGUOS 1, 2 Y 3 (C)	
15		C. TRANSMISIBILIDAD DEL AGUERO ENTRE	
		LOS AGUOS 1, 2 Y 3 (C)	
		C. COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES	
		DE SECANCE MUNDIO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
20		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
		C. DE LAS COLUMNAS DEL MODELO	
30		DIMENSION $(150 \times 50) + 10 (50 \times 50)$	
		$150 (150 \times 50) + 10 (50 \times 50)$	
		$150 (150 \times 50) + 10 (50 \times 50)$	
		C. ELIMINACION DE POSIBLES UNDERFLOWS	
35		C. CALLE ERNST (200, 250, 1, 1)	
		C.	
		C.	
40		LECTURA DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
45		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
50		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
55		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
60		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
65		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
70		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
75		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
80		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
85		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
90		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
95		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	
100		DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y	
		VALORES COMUNES	
		C.	
		C.	

```
C
C LECTURA DE LAS TARJETAS DE PUNTO
60 C
C 30 READ (5,40) (I,J) (I1,J1)
C I1(I1,J1)+SF(I1,J1)*M(I1,J1)+O(I1,J1)
C IE(I1,J1)+SU+30
C 40 FORMAT(213) (F6.0,2F4.0,176.0)
```

```
65 C
C COMIENZO DE LA SIMULACION
C
C 50 TIME=0.0
C DO 320 ISTEP=1,NSTEP5
C 70 TIME=TIME+DELTA
```

```
C
C PREDICCION DE NIVELES PARA EL SIGUIENTE
C INTERVALO DE TIEMPO
C
```

```
75 C
C DO 70 J=1,NC
C DO 70 J1=1,NM
C D=(I1,J1)+H(I1,J1)
C MC(I1,J1)+M(I1,J1)
C F=1.0
C 80 IF (D(I1,J1).EQ.0.0) GO TO 60
C IF (ISTEP.GE.2) F=DELTA(I1,J1)
C IF (F.GE.5) F=5.0
C IF (F.LT.0.0) F=0.0
C 90 D(I1,J1)=D
C 70 M(I1,J1)=M(I1,J1)+D*F
```

```
C
C REFINAMIENTO DE LAS ESTIMACIONES POR
C EL METODO 1401
C
```

```
95 C
C 110 M=
C 40 E=0.0001
C 130 IFCR=1.0001
```

```
C
C CALCULO POR COLUMNAS
95 C
C DO 140 I1=1,NC
C 150 I=1
C DO 160 ISTEP=1,IEP-2,1.0,1) I=NC-1
C 170 J=1,NM
```

```
100 C
C CALCULO DE LOS VECTORES Q Y S
C
```

```
105 C
C M1=SF(I1,J1)/DELTA
C M2=O(I1,J1)+SF(I1,J1)/DELTA-O(I1,J1)
C AM=0.0
C CM=0.0
C 110 I1(I1,J1)=100.00
C 40 M2=11(I1,J1)
C M1=SF(I1,J1)+1
C 120 I1(I1,J1)=110.00
C 130 CM=11(I1,J1)
C 140 M2=11(I1,J1)+1
C 150 I1(I1,J1)=120.00
C 160 M2=11(I1,J1)+2
```

```

115 DO 100 J=1,N
160 IF (I1-NC1) GO TO 165,150
150 DELTA=1/(J+2)
165 DDELTA=(1+J+1)*T(1+J,2)
170 W(1)=AA*(J+1)
175 W(J)=W(1)+AA*(J-1)/J

```

C ESTIMACION DE NIVELES

```

125 E=EPS*(M(1,N)-G(N))
130 M(1,N)=G(N)
135 M(1,N)=1
140 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
145 E=EPS*(M(1,N)-M(1,N+1))
150 M(1,N)=M(1,N)
155 M(1,N)=1
160 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
165 M(1,N)=M(1,N)
170 M(1,N)=1
175 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
180 M(1,N)=M(1,N)
185 M(1,N)=1
190 CONTINUE

```

C CALCULOS POR FILAS

```

135 DO 300 J=1,N
140 J=J+1
145 IF (M(1,1)+M(1,FR+2).EQ.1) J=FR+J+1
150 DO 200 L=1,NC
155 M(1,L)=1+J/DDELTA
160 D(1,L)=M(1,L)*SF(1+J)/DELTA-G(1+J)
165 A=0.0
170 CC=0.0
175 IF (J-1) GO TO 210,200
200 M(1,J)=T(1+J-1)
205 M(1,J)=M(1+J-1)*T(1+J-1)
210 M(1,J)=M(1,J)+D(1,J)+200,200
215 D(1,J)=M(1,J)*T(1+J)
220 M(1,2)=T(1+J)
225 IF (1+J) GO TO 240,230
230 SF=1/(1+J)
235 SF=1/(1+J)
240 SF=1/(1+J)
245 IF (1+J) GO TO 260,250
250 BL=SF*(1+J)
255 CC=1/(1+J)
260 W(1)=AA*(1+1)
265 W(1)=CC
270 W(1)=W(1)+AA*(1+1)
275 W(1)=W(1)+AA*(1+1)/J

```

C ESTIMACION DE NIVELES

```

135 E=EPS*(M(1,N)-G(N))
140 M(1,N)=G(N)
145 M(1,N)=1
150 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
155 E=EPS*(M(1,N)-M(1,N+1))
160 M(1,N)=M(1,N)
165 M(1,N)=1
170 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
175 M(1,N)=M(1,N)
180 M(1,N)=1
185 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
190 M(1,N)=M(1,N)
195 M(1,N)=1
200 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
205 M(1,N)=M(1,N)
210 M(1,N)=1
215 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
220 M(1,N)=M(1,N)
225 M(1,N)=1
230 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
235 M(1,N)=M(1,N)
240 M(1,N)=1
245 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
250 M(1,N)=M(1,N)
255 M(1,N)=1
260 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
265 M(1,N)=M(1,N)
270 M(1,N)=1
275 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
280 M(1,N)=M(1,N)
285 M(1,N)=1
290 M(1,N)=G(N)*M(1,N+1)
295 M(1,N)=M(1,N)
300 CONTINUE

```

C IMPRESSION DE RESULTATS

175

WRITE (5,10) LINE=ITER

110 FORMAT (1P,1E10.4,7///,E30.7+10)

DELTA=DELTA*1.2

DO 320 J=1,NH

122

320 WRITE (6,30) J*(NH+1)+1+NOI

330 FORMAT (1E10.4,1E10.4/(1E10.4))

STOP

END

SYMBOLIC REFERENCE MAP (HELI)

LINK POINTS

9130 IAD1

VARIABLES	SN	TYPE	RELLOCATION			
4000 A		REAL		42130	0	REAL ARRAY
4000 B		REAL		4643	07	REAL
4000 C		REAL		4641	08	REAL
4017 DELTA		REAL		47244	09	REAL ARRAY
4000 E		REAL		4609	ERROR	REAL
4000 F		REAL		42162	0	REAL ARRAY
4000 H		REAL	ARRAY	4646	HA	REAL
4000 NH		REAL		11304	HO	REAL ARRAY
4000 I		INTEGER		4607	II	INTEGER
4000 ISTEP		INTEGER		4675	ITER	INTEGER
4000 J		INTEGER		4647	JJ	INTEGER
4000 N		INTEGER		4601	NC	INTEGER
4000 ND		INTEGER		4616	NSTEPS	INTEGER
4000 D		REAL	ARRAY	4606	DO	REAL
4000 ST		REAL	ARRAY	4671	S1	REAL
4000 T		REAL	ARRAY	4671	TIME	REAL
4000 TT		REAL		4664	U	REAL

LINK DATA

MOD1

2 INPUT

205% OUTPUT

3 TAPES

ENT

205% TAPES

ENT

SYMBOLIC	TYPE	ARGS
ENT	REAL	1

RESET

FUNCTION	TYPE	ARGS
MOD	REAL	1 INTRIN

MOD

INTEGER

2 INTRIN

LINK DATA LABELS

SN	TYPE	START	END	INACTIVE
4000 10	ENT	0	20	
4000 20	ENT	4005	50	
4000 30		4047	50	
4000 100		0	110	INACTIVE
4000 110		411	140	
4000 120		0	170	

INACTIVE

4105 30

4710 50

0 50

4106 120

0 150

4300 180

INACTIVE

INACTIVE

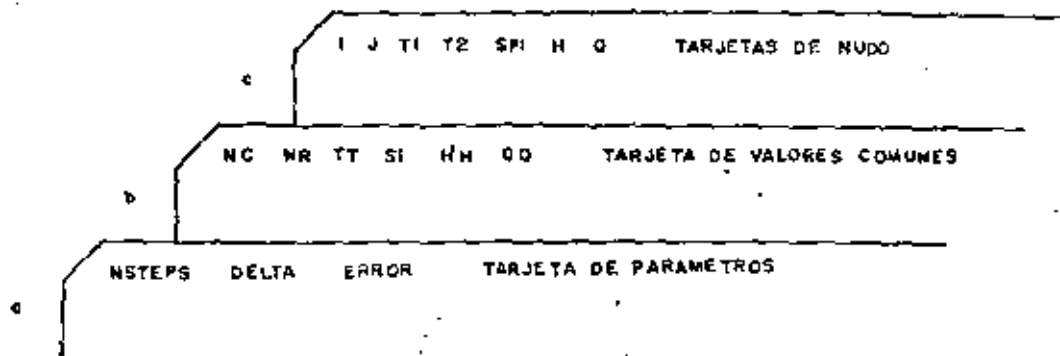


FIGURA 5.3

Como vemos en la figura 5.1 el incremento de tiempo no es constante sino que se va incrementando un 20%, $\Delta T = \Delta T \times 1.2$, ésto se debe a que al pasar el tiempo el cono de abatimiento varfa menos, entonces el tiempo aumenta de la siguiente manera:

ISTEP	TIEMPO
1	DELTA
2	DELTA + 1.2 x DELTA
3	DELTA + 1.2 x DELTA + 1.2 x (1.2 x DELTA)
...	...
ISTEP	$\{ \Delta T [1 + 1.2^1 + \dots + 1.2^{(ISTEP-1)}] \}$
NSTEPS	$\{ \Delta T [1 + 1.2^1 + 1.2^2 + \dots + 1.2^{(NSTEPS-1)}] \}$

donde:

ISTEP = número del incremento de tiempo

NSPEPS = número total de incrementos de tiempo en la simulación

DELTA = incremento de tiempo inicial

Podemos escribir

$$\text{TIEMPO} = \text{DELTA} \times \delta$$

donde:

$$\delta = 1 + 1.2^1 + 1.2^2 + \dots + 1.2^{(\text{ISTEP}-1)}$$

La tabla 5.1 muestra los valores de δ en función de ISTEP

ISTEP	δ	ISTEP	δ
1	1.00	26	567.38
2	2.20	27	681.85
3	3.64	28	819.22
4	5.37	29	984.07
5	7.44	30	1 181.88
6	9.93	31	1 419.26
7	12.92	32	1 704.11
8	16.50	33	2 045.93
9	20.80	34	2 456.12
10	25.96	35	2 948.34
11	32.15	36	3 539.01
12	39.58	37	4 247.81
13	48.50	38	5 098.37
14	59.20	39	6 119.06
15	72.04	40	7 343.86
16	87.44	41	8 813.63
17	105.93	42	10 577.36
18	128.12	43	12 693.83
19	154.74	44	15 233.59
20	186.69	45	18 281.31
21	225.03	46	21 937.29
22	271.03	47	26 327.29
23	326.24	48	31 593.74
24	392.48	49	37 913.49
25	471.98	50	45 497.19

TABLA 5.1

Por otro lado, para darnos una idea del orden del error podemos usar la siguiente fórmula empírica:

$$\text{ERROR} = Q \times \text{DELTA} / (10 \times \text{SFI}) \dots \dots \dots (5.3)$$

Por último, como se puede observar en la figura 5.3 después de la tarjeta con valores comunes viene la tarjeta de nudo, es decir, en aquella se meten los valores de las características del acuífero que son más frecuentes y en los últimos los valores específicos de cada nudo los cuales no son generales.

5.2 Modificaciones del programa básico de simulación de acuíferos

5.2.1 : Salida por categorías

En la figura 5.5 se pueden ver las tarjetas que se le incluyen al programa básico. Y en la figura 5.4 podemos ver un ejemplo de cómo menter las tarjetas de datos.

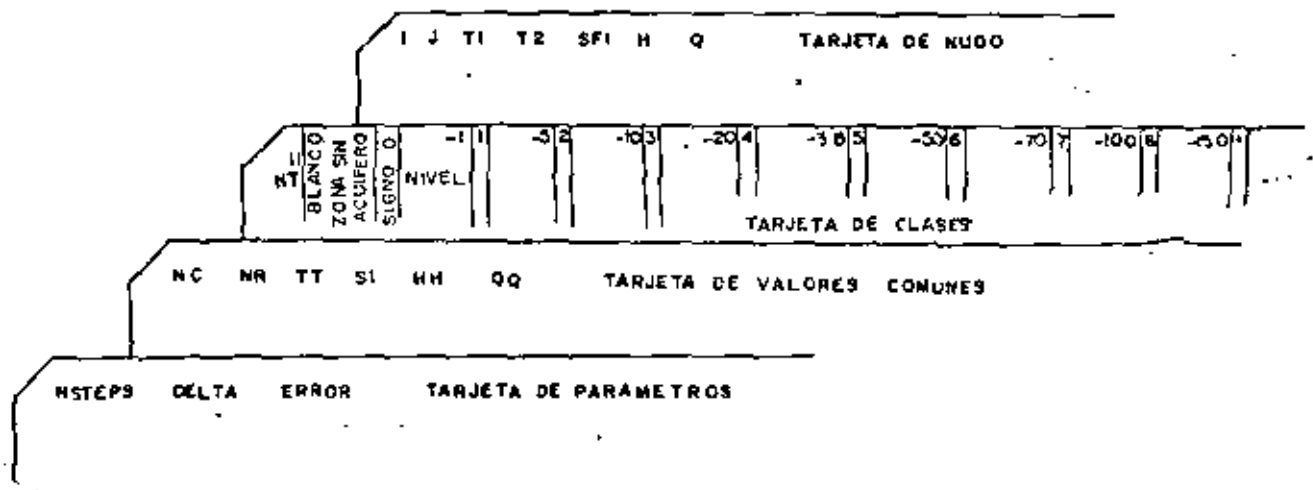


FIGURA 5.4

```

1 PROGRAM (TABLE1+OUTPUT+TABLE+INPUT+TABLE+OUTPUT)
C ILLINOIS STATE WATER SURVEY
C PROGRAMA BASICO DE SIMULACION DE ACHEFENOS
C
5 C DEFINICION DE VARIABLES
C C(11,1)---NIVELES PIEZOMETRICOS INICIALES
C C(11,2)---EL NUMO (11,2)
C C(11,3)---NIVELES PIEZOMETRICOS AL FINAL DEL
C C(11,4)---INCREMENTO DE TIEMPO (11)
11 C C(11,5)---FRACCION DE ALMACENAMIENTO PARA
C C(11,6)---CONDICIONES DE CONFUNDIMIENTO(11)
C C(11,7)---CONDICIONES DE FONDO CONSTANTE (11)
C C(11,8)---PERMEABILIDAD DEL ACHEFENO ENTRE
C C(11,9)---LOS ANOS 1,2 E 3,41 (11,9,1)
15 C C(11,9,2)---PERMEABILIDAD DEL ACHEFENO ENTRE
C C(11,9,3)---LOS ANOS 1,2 E 2,41 (11,9,2)
C C(A,B)---COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES
C C(11,10)---DE ARREGLO HIDRICO
C C(11,11)---NUMO DE FILAS DEL MODELO
20 C C(11,12)---NUMO DE COLUMNAS DEL MODELO
C C(11,13)---NUMO DE INCREMENTOS DE TIEMPO
C C(11,14)---INCREMENTO DE TIEMPO (11,14)
C C(11,15)---VALORES COMUNES
C C(11,16)---NUMERO DE COLUMNAS
25 C C(11,17)---NUMERO DE FILA
C C(11,18)---NUMO DE CATEGORIAS
C C(11,19)---VALOR DEL NIVEL PARA LA CATEGORIA
C
C
30 C
C
C
C DIMENSION N(50,50),M(50,50),
C I(50,50),J(50,50),K(50,50,2),
C Z(50),G(50),OL(50,50)
35 C Z(50,150),L(50,20)
C
C ELIMINACION DE POSIBLES UNDERFLOWS
C
C CALL FBASE(200,250,51)
40 C
C
C
C LECTURA DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y
C VALORES COMUNES
45 C
C READ(11)N,M,K,L,G,Z,P
C INFO=1,51,50,00
C IO F(2,41),F(3,41),G(2,50,0)
C
50 C LECTURA DE LOS SIMBOLOS DE REPRESENTACION
C DE CADA CATEGORIA
C F(10,11),M(11,12),L(12,13),J(14,15)
C I(17,18),Z(19,20)
C
55 C LLENADO DE LAS MATRICES CON LOS VALORES COMUNES
C
C GO TO 100

```

FIG. 5.5

```

60 DO 70 J=1,NM
   I1(I,J)=I1(I,J)+1
   S1(I)=S1(I)+1
   N1(I)=N1(I)+1
   M1(I)=M1(I)+1
70 CONTINUE
65 C
   C LECTURA DE LAS TARJETAS DE TIPO
   C
   C 30 N=ABR(0,0,1,0,1,1,1,1,1,1)
   I1(1,1)=S1(1,1)+M1(1,1)+N1(1,1)
70 IF (COT(1,1))=0
   AC=AC+1
   C CONSEJO DE LA SIMULACION
   C
75 S0=TIME(0,0)
   DO 80 I=1,NINSTPS
   TIME(I)=0.0
80 C PREDICCION DE NIVELES PARA EL SIGUIENTE
   C INTERVALO DE TIEMPO
   C
   DO 70 J=1,NM
   DO 70 I=1,NM
   I1(I,J)=I1(I,J)+1
   N1(I)=N1(I)+1
   S1(I)=S1(I)+1
   IF (COT(1,1,2,0,0,0,0,0,0,0) TO 60
   I1(1,1)=I1(1,1)+2*I1(1,1)
   IF (COT(1,1,1,0,0,0,0,0,0,0)
   I1(1,1)=I1(1,1)+1
   DO 70 I=1,NM
   DO 70 J=1,NM
   I1(I,J)=I1(I,J)+1
85 C CORRECCIONES DE LAS ESTIMACIONES POR
   C EL METODO IRLI
   C
   I1(I,J)=I1(I,J)
   S1(I)=S1(I)
   N1(I)=N1(I)
90 C
   C CALCULO DE COLUMNAS
   C
   DO 100 I=1,NM
   I1(I)=I1(I)
   S1(I)=S1(I)+I1(I)
   N1(I)=N1(I)+I1(I)
100 C
   C CALCULO DE LOS VECTORES R Y Q
   C
110 N=ABR(1,1,1,0,1,0,1,1,1,1)
   N=ABR(1,1,1,0,1,1,1,1,1,1)
   S1(I)=S1(I)+N
   N1(I)=N1(I)+N

```

```

115      90  A2=I1*J-1*11
      100  B2=I1*J+1*11
      110  CC=I1*J*11
      120  IF I1-111100-100/130
      130  B2=I1*J-1*11
      140  B2=I1*J+1*11*(1-1*J*2)
      150  IF I1-111100-100/130
      160  B2=I1*J*11
      170  B(I)=CC/2

```

```

      C
130      C  DESTINACION DE NIVELES
      C

```

```

      C  EXPRESION (N(I,NB)-R(NB))
      C  N(I,NB)=R(NB)
      C  N(I,NB)
140      B2=I1*J+1*11*(1-1*J*2)
      C  EXPRESION (R(NB)-N(I,NB))
      C  N(I,NB)
      C  N(I,NB)
      C  IF I1-111100-100/130

```

```

140      120  CONTINUE
      C
      C  CALCULOS POR FILAS
      C

```

```

145      100  J=I+1
      C  J=J
      C  IF (I1-111100-100/130) GOTO 150
      C  100  J=I+1
      C  B(I)=I1*J/DELTA
      C  B(I)=I1*J/DELTA+0.11*J
      150      200  J=I+1
      C  J=J
      C  IF I1-111100-100/130
      210  B(I)=I1*J-1*11*(1-1*J*2)
      220  B(I)=I1*J+1*11*(1-1*J*2)
      230  B(I)=I1*J*11
      240  B(I)=I1*J*11
      250  B(I)=I1*J*11
      260  B(I)=I1*J*11
      270  B(I)=I1*J*11
      280  B(I)=I1*J*11
      290  B(I)=I1*J*11
      300  B(I)=I1*J*11
      310  B(I)=I1*J*11
      320  B(I)=I1*J*11
      330  B(I)=I1*J*11
      340  B(I)=I1*J*11
      350  B(I)=I1*J*11

```

```

      C
      C  DESTINACION DE NIVELES
      C
170      C  EXPRESION (R(NC)-R(NC))
      C  B(NC)=R(NC)

```


donde:

NT = 11

BLANCO = zona sin acuífero, no imprime nada

0 = hasta -1

1 = hasta -5

2 = hasta -10

3 = hasta -20

4 = hasta -30

5 = hasta -50

6 = hasta -70

7 = hasta -100

8 = hasta -150

9 = hasta -200

5.2.2 Bombeos variables en el tiempo

En la figura 5.6 podemos ver un ejemplo de cómo varía el bombeo con el tiempo.

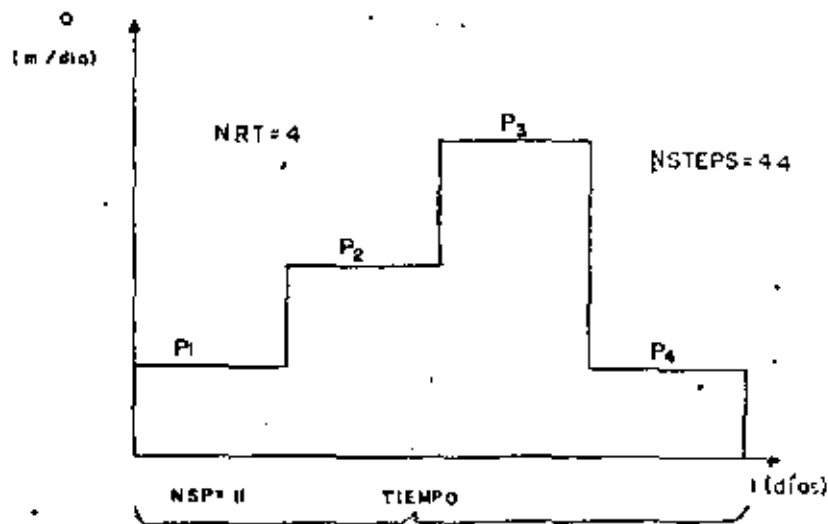


FIGURA 5.6

```

1      PROGRAM TAP1(INPUT,OUTPUT,TAPE=... (PUT)
C ILLINOIS STATE WATER SURVEY
C PROGRAMA BASICO DE SIMULACION DE AGUÍFEROS
C
5 C DEFINICION DE VARIABLES
C H0(1:J)-----NIVELES PIEZOMETRICOS INICIALES
C              (E EL MUNDO (1:J))
C H1(1:J)-----NIVELES PIEZOMETRICOS AL FINAL DEL
C              INCREMENTO DE TIEMPO (M)
10 C S(1:1:J)----FACTOR DE VARIACION PARA
C              CONDICIONES DE CARGA INICIAL (M)
C Q(1:1:J)----CAUDAL DE BOMBEO CONSTANTE (M3/DIA)
C T(1:J:1)----TRANSMISIVIDAD DEL AGUÍFERO ENTRE
C              LOS MUNDOS 1 Y 2 (1:1:1) (M2/DIA)
15 C T(1:J:2)----TRANSMISIVIDAD DEL AGUÍFERO ENTRE
C              LOS MUNDOS 1 Y 2 (1:1:1) (M2/DIA)
C A(1:1:1:1)---COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES
C              DE BALANCE HIDRICO
C M-----NO. DE FILAS DEL MODELO
20 C N-----NO. DE COLUMNAS DEL MODELO
C NSIEMS-----NO. DE INCREMENTOS DE TIEMPO
C DELTA-----INCREMENTO DE TIEMPO (DIAS)
C H(1:1:1:1)---VALORES COMUNES
C I-----NUMERO DE COLUMNA
25 C J-----NUMERO DE FILA
C IP-----COORDENADA I DEL MUNDO BOMBEOADO
C JP-----COORDENADA J DEL MUNDO BOMBEOADO
C K(1:K)-----CAUDAL DE BOMBEO EN EL POZO K
C              DE VALOR K (M3/DIA)
30 C NP-----NO. DE MUNDOS BOMBEOADOS
C NSP-----NUMERO DE INCREMENTOS DE TIEMPO
C              EN CADA CAMBIO DE MUNDO
C NBT-----NUMERO DE CAMBIOS DE REGIMEN DE BOMBEO
C
35 C
C
C
C
40 C DIFERENCIAL H(50,50)+H(50,50)+
C              1*(50,50)+2*(50,50)+3*(50,50)+
C              2*(50,50)+6*(50,50)+4*(50,50)
C              5*(100)+J*(100)+K*(10,10)
C
C
45 C ELIMINACION DE POSIBLES UNDERFLOWS
C
C
C
C
50 C LEITURA DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y
C              VALORES COMUNES
C
C
C
C
55 C LEITURA DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y
C              VALORES COMUNES
C

```

```

C
60 READ(5,11)NP+RSP+NET
   11 FORMAT(3I6)
C
C LECTURA DEL REGIMEN DE BOMBO
C
65 DO 12 I=1,NP
   12 READ(5,13) IP(I),JP(I),
      13 F(1+I),K=1,MM(I)
      13 F(2+I),2F6.0)
C
C LLENADO DE LAS MATRICES CON LOS VALORES COMUNES
C
70 DO 20 I=1,NC
   DO 20 J=1,NN
      T(I,J,1)=11
      T(I,J,2)=11
75   SF(I,J)=S1
      H(I,J)=H1
      HC(I,J)=H1
   20 Q(I,J)=Q1
C
C LECTURA DE LAS TARJETAS DE MODO
C
80 READ(5,40)J,J,1(T,J,1),
   11(T,J,2),SF(I,J),M(I,J),Q(I,J)
85   IF(M(I,5))40,30
   40 FORMAT(2I3+2F6.0+2F4.0+1F6.0)
C
C COMIENZO DE LA SIMULACION
C
90 TIME=0.0
   DELT=DELTA
   K=1
   DO 500 ISTEP=1,NSTEPS
C
C ENTRADA DE REGIMENES DE BOMBO
C
95   Z=(ISTEP-1.0)/NSP+1.0
      IS(I,2)=53+51.53
      DO 100 K=1,NN
100     I=IP(K)
          J=JP(K)
          Q(I,J)=PIK+KQI
          PELT=DELTA
          K=K+1
C
C PREDICCION DE NIVELES PARA EL SIGUIENTE
C INTERVALO DE TIEMPO
C
110 DO 70 I=1,NC
   DO 70 J=1,NN
      H=H(I,J)+F(I,J)*DELT
      HC(I,J)=H(I,J)
      K=1+K
      IF(M(I,J))50,60 TO 60
      IF(ISTEP,DELTA,2)H=H/PL(I,J)
      IF(PL(I,J))H=H*PL(I,J)

```



```

115      TIME=TIME*DELTA
      COOR(I,J)=COOR(I,J)+DELTA*
      TIME=TIME+DELTA
C
C REF INICIO DE LAS ESTIMACIONES POR
120 C EL METODO TAD1
C
      TIME=TIME*DELTA
      ITR=0
125 40 LE=0
      ITR=ITR+1
C
C CALCULO POR COLUMNAS
C
130 DO 140 J=1,N
      I=1
      IF (COOR(I,J)-COOR(I,J+1)) .EQ. 0 I=I+1
      GO TO 170 J=J+1
C
C CALCULO DE LOS VECTORES D Y G
C
      GD=SF(I,J)/DELTA
      DP=DP+(I+J)*SF(I,J)/DELTA+G(I,J)
      AD=0.0
      CD=0.0
140 IF (J-1) 90,100,90
      90 AZ=-T(I,J-1)
      100 AP=AP+T(I,J-1)
110 IF (J-1) 110,120,110
      110 CC=-T(I,J-1)
      120 IF (I-1) 130,140,130
      130 AC=-T(I-1,J-2)
      140 IF (I-1) 150,160,150
150 150 AD=AP+T(I,J-2)
      160 AC=AP+T(I-1,J-2)
      170 G(I,J)=(AD-AC*G(I-1))/J
C
C ESTIMACION DE NIVELES
C
      FES=APC(H(I)+BR)-PC(M(I))
      H(I)=G(I)
      NETP=1
180 180 H(I)=H(I)+H(I)*FES
      190 190 H(I)=H(I)+H(I)*FES
      NETP=NETP+1
      IF (I) 190,190,190
190 CONTINUE
C
C CALCULO POR FILAS
C
170 DO 180 I=1,N
      J=1

```

```
195      IF (MOD(ISTEP*(1+J),CO+1) .EQ.0) GO TO 200
      DO 200 J=1,N
      WRITE(11,10)ZD(J),T
      IF (MOD(J),5) .EQ. 1) WRITE(11,10)ZD(J)
      A=Z(J)
      C=Z(J)
      IF (C=0) Z(J)=Z(J)+Z(J)
200      A=Z(J)+Z(J)+Z(J)
      B=Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)
210      IF (B=0) Z(J)=Z(J)+Z(J)
220      B=Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)
      W=Z(J)+Z(J)+Z(J)
230      IF (W=0) Z(J)=Z(J)+Z(J)
240      W=Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)
      A=Z(J)+Z(J)+Z(J)
250      IF (A=0) Z(J)=Z(J)+Z(J)
260      W=Z(J)+Z(J)+Z(J)
      C=Z(J)+Z(J)
270      W=Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)
      G(J)=Z(J)
280      G(J)=Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)
C
C      INVESTIGATION OF INVULSES
195      C
      G=ACOS(1-(CO+J)-SINC)
      H(C,J)=G(1)
      N=100
290      H=Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)
      F=Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)
      H(C,J)=H
      W=1
      IF (N .EQ. 0) GO TO 300
300      GO TO 195
      IF (H .GT. 0) GO TO 30
C
C      IMPRESSION OF RESULTS
C
      W=1
210      PRINT(11,10)H,C,F+100
      GO TO 200
      W=Z(J)+Z(J)+Z(J)
320      W=Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)
330      PRINT(11,10)Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)+Z(J)
215      C
      STOP
      END
```

SYMBOLIC REFERENCE MAP (R=1)

FORM POINTS
4133 107

En la figura 5.7 se muestra el listado del programa y en la figura 5.3 la manera de meter las tarjetas de datos.

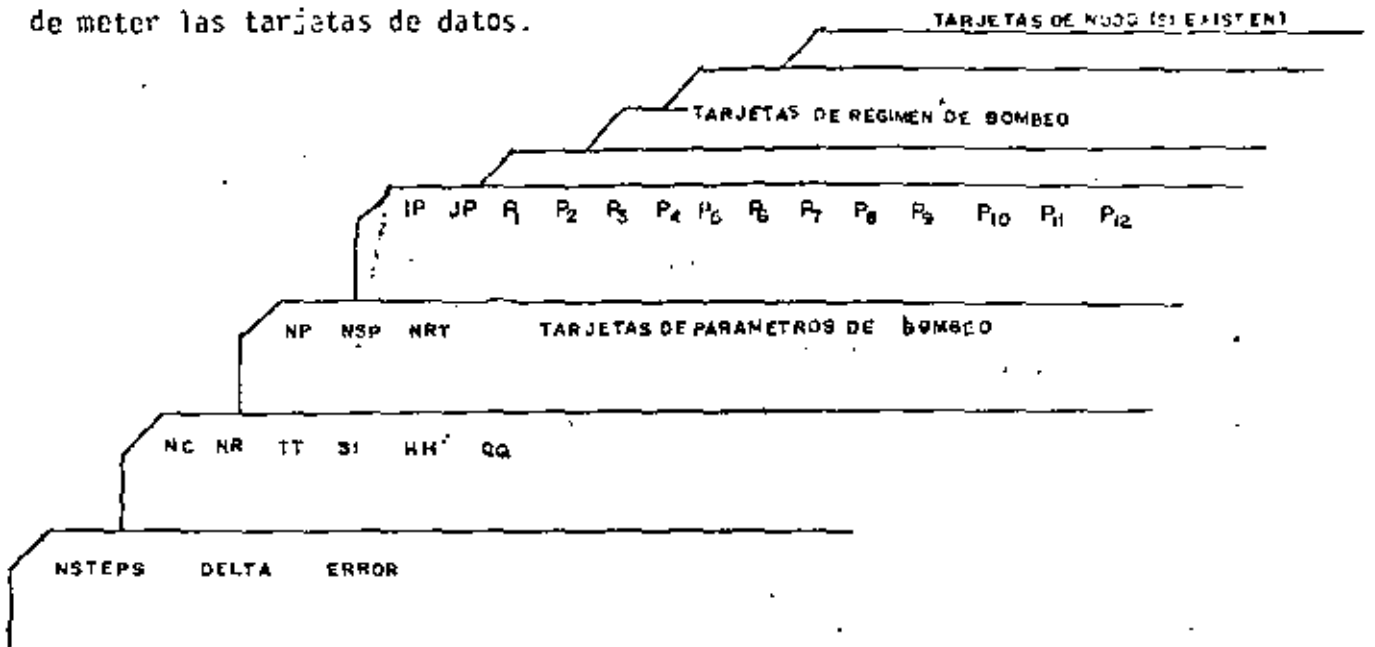


FIGURA 5.8

5.2.3 Condiciones de semiconfinamiento

En la figura 5.9 se muestran las variables que intervendrán en este tipo de acuífero.

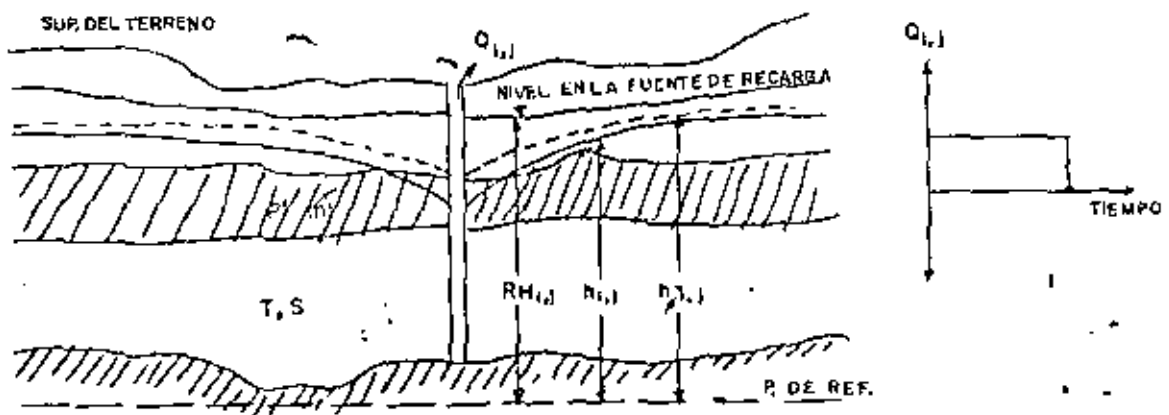


FIGURA 5.9

En este caso se supone que el nivel de agua en la fuente de recarga que causa el goteo permanece constante, se desprecia el almacenamiento en la capa semiconfinante y se supone que el nivel piezométrico del acuífero no desciende por debajo del nivel del semiconfinante.

Walton (1960) propone una ecuación derivada de la ley de Darcy, que describe el caudal del goteo a través de las capas semiconfinantes:

$$Q_n = (P'/m') \cdot \Delta h \cdot A_c \dots \dots \dots (5.4)$$

donde:

Q_n = caudal a través de la capa semiconfinante, $m^3/\text{día}$

P' = conductividad hidráulica vertical de la capa semiconfinante, $m^3/\text{día}/m^2$

m' = espesor de la capa semiconfinante m

Δh = diferencia entre los niveles piezométricos del acuífero y de la fuente de recarga situada sobre la capa semiconfinante m .

A_c = área del lecho semiconfinante, a través del cual se verifica el goteo, m^2

O sea:

$$\Delta h = RH_{i,j} - h_{i,j} \dots \dots \dots (5.5)$$

y

$$A_c = \Delta x \Delta y \dots \dots \dots (5.6)$$

Sustituyendo (5.5) y (5.6) en la ecuación (5.4) tenemos que:

$$Q_n = \left(\frac{P'}{m'}\right) \Delta x \Delta y (RH_{i,j} - h_{i,j}) \dots \dots \dots (5.7)$$

```

1 PROGRAM (JOB) (INPUT+OUTPUT+TAPES+INPUT+TAPES+OUTPUT)
C ILLINOIS STATE WATER SURVEY
C PROGRAMA BASICO DE SIMULACION DE ACUIFEROS
C
5 C DEFINICION DE VARIABLES
C H(11,J)-----NIVELES PIEZOMETRICOS INICIALES
C EN EL NUDO (I,J)
C H(11,J)-----NIVELES PIEZOMETRICOS AL FINAL DEL
C INCREMENTO DE TIEMPO (H)
10 C SF(11,J)-----FACTOR DE AJUSTAMIENTO PARA
C CONDICIONES DE CONFINAMIENTO (H/DIA)
C HT(1,J)-----CAUALES DE DIBREO CONSTANTE (H/DIA)
C T(1,J,1)-----TRANSIMISIVIDAD DEL ACUIFERO ENTRE
C LOS NUDOS 1+J Y 1+J+1 (H/DIA)
15 C T(1,J,2)-----TRANSIMISIVIDAD DEL ACUIFERO ENTRE
C LOS NUDOS 1+J Y 1+J+1 (H/DIA)
C R(1,J)-----FACTOR DE RECARGA (H/DIA)
C RH(1,J)-----NIVEL DEL AGUA EN EL RIO (H)
C A(11,11,11)-----COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES
C DE BALANCE HIDRICO
20 C NP-----NO. DE FILAS DEL MODELO
C NC-----NO. DE COLUMNAS DEL MODELO
C NSTEPS-----NO. DE INCREMENTOS DE TIEMPO
C DELTA-----INCREMENTO DE TIEMPO (DIAS)
25 C H(11,11)=VALORES COMUNES
C I-----NUMERO DE COLUMNA
C J-----NUMERO DE FILA
C
C
30 C
C
C DIMENSION H(50,50),HO(50,50),
C SF(50,50),HT(50,50),T(50,50,2),
C A(50,50,50),DL(50,50),R(50,50),
35 C RH(50,50)
C
C ELIMINACION DE POSIBLES UNDERFLOWS
C
C CALL FURSET(700,250,-1,1)
40 C
C
C
C LECTURA DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y
C VALORES COMUNES
45 C
C READ(5,10)NSTEPS,DELTA,ERROR,
C INC,NO,11,51,NO,20,6,1,20H
C 10 FCH,11(15,2F6.6/21,15F6.6)
C
C
50 C
C
C LLENADO DE LAS MATRICES CON LOS VALORES COMUNES
C
C DO 20 I=1,NC
C DO 20 J=1,NP
55 C H(1,J,1)=11
C H(1,J,2)=11
C SF(11,J)=1

```

```

63      H(1,J)=0
        H(2,J)=0
        H(3,J)=0
        H(4,J)=0
        20 H(1,J)=0
C
C      LECTURA DE LAS TARJETAS DE DATOS
65      C
        30 READ(5,40)I,J,DELTA(1,J),
            11(1,J),21(1,J),S(11,J),H(1,J),H(11,J)
            24(1,J),4(1,J)
            11(11,J),50(1,J)
70      40 FORMATT(13,2F6.0,2F4.0,3F6.0)
C
C      COMIENZO DE LA SIMULACION
C
75      50 TIME=0.0
        DO 370 ISTEP=1,ISTEPS
            TIME=TIME+DELTA
C
C      PROYECCION DE NIVELES PARA EL SIGUIENTE
C      INTERVALO DE TIEMPO
80      C
        53 DO 70 I=1,NC
            DO 70 J=1,NC
                H(11,J)=H(1,J)
                H(1,J)=H(11,J)
                F=1.0
                IF(DL(1,J).GT.0.0)GO TO 60
                IF(ISTEP.GE.2)F=0/DL(1,J)
                IF(F.LT.-5)F=5.0
                IF(F.LT.0.0)F=0.0
90      60 H(11,J)=0
            70 H(11,J)=H(1,J)+0*F
C
C      REFINAMIENTO DE LAS ESTIMACIONES POR
C      EL METODO 1401
75      C
            ITER=0
            80 F=0.0
                ITER=ITER+1
C
C      CALCULO POR COLUMNAS
100      C
                DO 190 I=1,NC
                    I=1
                    IF(DD(15)I)F=I(DD(2)I,DD(1)I)H(11,I)+1
105      DO 170 J=1,NC
C
C      CALCULO DE LOS VECTORES D Y G
C
110      D(1,J)=DELTA*H(11,J)
            G(1,J)=(H(11,J)+S(11,J))/DELTA-G(1,J)+
                11(11,J)*H(11,J)
            AA=0.0
            CC=0.0
            IF(I)=1)G(1,10)=90
    
```

```

115      90  ZA=-T(I+J-1+1)
      100  WZ=PH*(I+J-1+1)
      110  IF (J=2) III=I*W+110
      120  CO=-1/(I+J+1)
      130  WZ=PH*(I+J+1)
120      120  IF (I=1) III=I+0+130
      130  WZ=PH*(I+1+J+2)
      140  WZ=PH*(I+1+J)*T(I+1+J+2)
      150  WZ=PH*(I+J+2)
125      160  WZ=PH*(I+1+J)*T(I+J+2)
      170  WZ=PH*(I+J+1)
      180  G(J)=(70-AA*G(J-1))/W
C
130      C
      C  ESTIMACION DE NIVELES
      C
      C  REF+ASC(H(I+NN)-G(M))
      C  H(I+NN)=G(M)
      C  M=5-1
135      180  H=H(N)-J(N)*H(I,N+1)
      190  H=H(N)-H(I,N)
      200  H(I+1)=H
      210  M=M-1
      220  IF (M) 190,190,180
140      190  CONTINUE
C
      C  CALCULOS POR FILAS
      C
      C  DO 300  J=1,NR
      C  J=J
      C  IF (NR) (S1+*+11ER+2),ER,1)  J=J+J+1
      C  DO 280  I=1,NC
      C  WZ=PH*(I+J)/DELTA+P(I,J)
      C  WZ=PH*(I+J)*S1+T(I,J)/DELTA+Q(I,J)+
150      190  G(I+J)*H(I+J)
      200  AA=PH*P
      210  CC=Q*P
      220  IF (I=1) 240,210,200
155      230  WZ=PH*(I+J-1+1)
      240  WZ=PH*(I+J+1)*T(I+J-1+1)
      250  IF (J=2) 270,230,220
      260  WZ=PH*(I+J+1)*T(I+J+1)
      270  WZ=PH*(I+J+1)
160      280  IF (I=1) 240,250,240
      290  WZ=PH*(I+1+J+2)
      300  AA=-T(I+J+2)
      310  IF (I=1) 270,280,260
      320  WZ=PH*(I+J+2)
      330  CO=-1/(I+J+2)
165      270  WZ=PH*(I+1)
      280  WZ=PH*(I+J)
      290  G(J)=(70-AA*G(J-1))/W
C
      C  ESTIMACION DE NIVELES
      C
170      C
      C  REF+ASC(H(I,C+J)-G(M))

```

```

      H(1,J)=0.1NCI
      N=N-1
175  290 HZ=H(I)-H(I+1)*H(N+1,J)
      F=F+ABS(H(N,J)-H(I,J))
      H(I,J)=HA
      N=N-1
      IF (I-1200,210,290)
170  300 CONTINUE
      IF (ERROR) GO TO B3
C
C IMPRESSION DE RESULTATS -
C
      I=1; J=1; ISTEP=1; ITER
105  310 FORMAT('H2 TIME =',F6.2,'/',F20.7,'15)
      DELTA=DELTA*1.2
      DO 320 J=1,NN
190  320 WRITE(6,330)J, (H(I,J), I=1,100)
      330 FORMAT('15.5X,10F10.4/(12X,10F10.4))
C
      STOP
      END

```

SYMBOLIC REFERENCE MAP (R=1)

ENTRY POINTS
4176 IAD1

VARIABLES	SN	TYPE	RELOCATION				
4567	AA	REAL		42120	B	REAL	ARRAY
4568	BB	REAL		4568	CC	REAL	
4569	D	REAL		4601	DD	REAL	
4575	DELTA	REAL		47264	DL	REAL	ARRAY
4576	E	REAL		4836	ERROR	REAL	
4577	F	REAL		48202	G	REAL	ARRAY
4578	N	REAL	ARRAY	4884	HA	REAL	
4581	HA	REAL		11574	HO	REAL	ARRAY
4587	I	INTEGER		4897	II	INTEGER	
4592	ISTEP	INTEGER		1605	ITER	INTEGER	
4593	J	INTEGER		4887	JJ	INTEGER	
4595	NCI	INTEGER		4617	NC	INTEGER	
4598	NO	INTEGER		4834	NSTEPS	INTEGER	
4713	Y	REAL	ARRAY	4844	ON	REAL	
4717	Z	REAL	ARRAY	54074	PN	REAL	ARRAY
4845	BB	REAL		4881	RR	REAL	
14530	GF1	REAL	ARRAY	4842	SI	REAL	
4810	T	REAL	ARRAY	4651	TIME	REAL	
4861	TT	REAL		4884	R	REAL	

Haremos

$$R_{i,j} = \left(\frac{P'}{m'}\right) \Delta x \Delta y \dots \dots \dots (5.8)$$

donde

$R_{i,j}$ = factor de recarga, en $m^3/\text{día}/m$

Entonces

$$Q_n = R_{i,j} RH_{i,j} - R_{i,j} h_{i,j} \dots \dots \dots (5.9)$$

En la figura 5.10 y 5.11 se presentan el listado del programa y las tarjetas de datos, respectivamente.

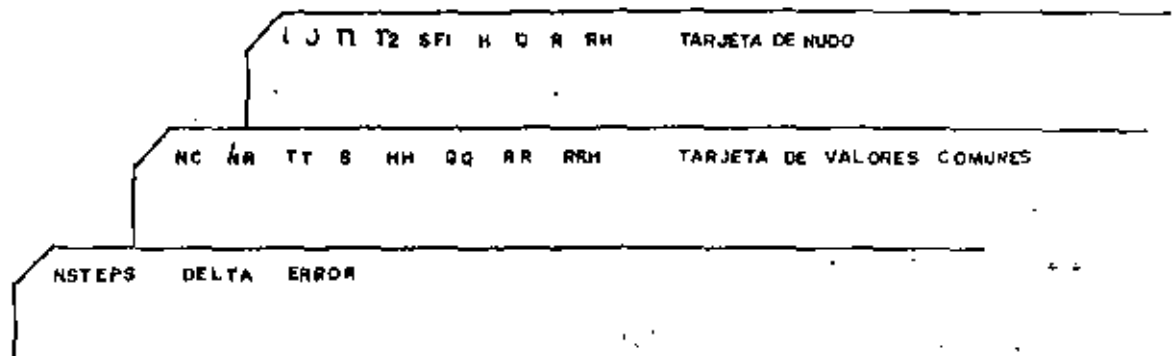


FIGURA 5.11

5.2.4 Recarga inducida

En la figura 5.12 se presentan las variables y la relación caudal recargado-nivel piezométrico para este caso.

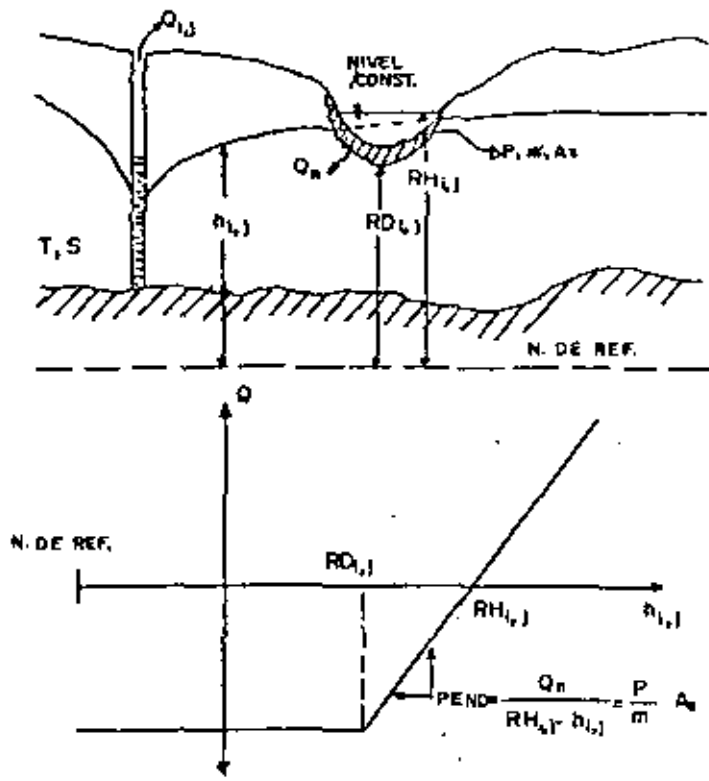


FIGURA 5.12

La ecuación que expresa el caudal que atraviesa el lecho del río, que también es una modificación de la ley de Darcy, en

$$Q_n = \left(\frac{P}{m'} \right) A_h A_s \dots \dots \dots (5.10)$$

donde:

Q_n = caudal recargado en $m^3/día$

P' = permeabilidad del lecho del río, en $m^3/día/m^2$

m' = espesor del lecho del río, en m

As = área del lecho del río asignado al nudo, en m^2

Δh = diferencia entre la superficie del río y los niveles piezométricos del acuífero en m.

También

$$\Delta h = RH_{i,j} - h_{i,j} \dots \dots \dots (5.11)$$

Y la máxima diferencia de nivel será:

$$\Delta h_{m\acute{a}x} = RH_{i,j} - RD_{i,j}$$

Sustituyendo (5.11) en (5.10)

$$Q_n = \left(\frac{P'}{m'}\right) As(RH_{i,j} - h_{i,j}) \dots \dots \dots (5.12)$$

Luego

$$R_{i,j} = \left(\frac{P'}{m'}\right) As \dots \dots \dots (5.13)$$

donde:

$R_{i,j}$ = factor de recarga para los nudos del río, en $m^3/día/m$

Entonces

$$Q_n = R_{i,j} RH_{i,j} - R_{i,j} h_{i,j} \dots \dots \dots (5.14)$$

PROGRAMA (M011001) (M0101, TAP05=INPUT, TAP06=OUTPUT)

C ILLINOIS STATE WATER SERVICE
C PROGRAMMA PASICO DE SIMULACION DE AGUAFUOS

5 C DEFINICION DE VARIABLES
C H(11,J)-----NIVELES DE ZONETRICOS INICIALES
C EN EL FONDO (M,J)

C H(1,J)-----NIVELES DE ZONETRICOS AL FINAL DEL
C TIEMPO (M,J)

10 C SF(11,J)-----FACTOR DE ESCALADO PARA
C CONDICIONES DE CONTINUIDAD (M,J)

C P(11,J)-----CANALES DE FONDO CONSTANTES (M,J)

15 C T(11,J)-----TRANSMISIVIDAD DEL AGUAFUO (M,J)

C R(11,J)-----FACTOR DE RECARGA (M,J)

20 C AF(11,J)-----COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES
C DE BALANCE HIDRICO

C M-----NO. DE FILAS DEL MODELO

C N-----NO. DE COLUMNAS DEL MODELO

C S-----NO. DE INCREMENTOS DE TIEMPO

25 C DT-----INCREMENTO DE TIEMPO (DIAS)

C VAL(1,M)-----VALORES COMUNES

30 C I-----INDICE DE FILA

C H(I,J)-----NIVEL DEL AGUA EN EL RIO (M,J)

C E(I,J)-----ELEVACION DEL FONDO DEL CAUCE (M,J)

35 C

DIFF(50,50) = H(50,50) - H(50,50) +
1 * (H(50,50) - H(50,50)) + T(50,50) *
2 * (H(50,50) - H(50,50)) + P(50,50) *
3 * (H(50,50) - H(50,50))

40 C ESTIMACION DE POSIBLES DIRECTORES

CALL PRSE (200, 250, 1, 1)

45 C LECTURA DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y
C VALORES COMUNES

READ(6,10) STICS, IRLTA, FORDR,
1 * CR, RT, S, ST, STG, STG, STG, STG,
10 * FORDR, IRLTA, FORDR

50 C LLENADO DE LAS MATRICES CON LOS VALORES COMUNES

DO 20 I=1,10
DO 20 J=1,10
H(I,J)=1
E(I,J)=1

SE (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1

LECTURA DE LAS TARJETAS DE TIEMPO

MEDIA (S) (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1

CONJUNTO DE LA SIMULACION

MEDIA (S) (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1

PREDICCIÓN DE NIVELES PARA EL SIGUIENTE
INTERVALO DE TIEMPO

MEDIA (S) (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1

MEDIA (S) (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1

REFINAMIENTO DE LAS ESTIMACIONES POR
EL METODO TALL

MEDIA (S) (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1

CONJUNTO DE LA SIMULACION

MEDIA (S) (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1

CALCULO DE LOS NIVELES \bar{y} Y \bar{y}^2

CONJUNTO DE LA SIMULACION POR GRUPO

MEDIA (S) (1,1) (J) (S) 1
M (1,1) (J) (S) 1

115 MF=1.0
G1=IG*2
M1=100*(1-J)*SF*(1+J)*R(1,J)
M2=0.1
M2=50*(1+J)*SF*(1+J)/DELTA*(1+J)*RE
120 M2=50*(1+J)/DELTA*(1+J)*RB
M2=0.0
CCE=0
IF(10-1190*109.50
M2=11*(J+1.1)
125 M2=81*(1+J)+1.1
100 IF(10-8111*120*110
110 CCE=11*(J+1)
M2=81*(1+J)+1.1
120 IF(1-11130*140*120
130 M2=81*(1+J)+1.2
130 M2=81*(1+J)+1.1*J*2
140 IF(1-8111*150*150
150 M2=81*(1+J)+2
M2=81*(1+J)*2
135 160 M2=81*(1+J)*2
M2=CC*J
170 G(C)=100-AR*G(C)-11/J

C
C IDENTIFICACION DE NIVELES

140 C
L=57/55*(11+M1)-54N(1)
M1=(L+5)*G(10)
N=1
100 M2=81*(1+J)*2
145 EXP=AR*(DA-M(C)-N)
M(C)=M2*PA
N=1
IF(10-190*190*180
190 CONTINUE

150 C
C CALCULOS POR FILAS

DO 200 J=1,NR
J=J+1
155 IF(10-1190*1190*2150*11) M2=J+1
M2=200-181*NC

C CONTROL DE LA INFILTRACION DEL CARGO

160 IF(10-1190*(1+J)*60*10
M2=81*(1+J)*2
M2=1.0
G1=10*10
101 M2=81*(1+J)*2*(1+J)
M2=1.1

165 152 M2=50*(1+J)*SF*(1+J)/DELTA*(1+J)*RE
M2=50*(1+J)/DELTA*(1+J)*RB
M2=0.0
CCE=0
IF(10-11200*210*200
170 200 M2=81*(1+J)+1.1
M2=81*(1+J)+1.1*J*2

```

210 IF (J-1) GO TO 240-270
220 GOTO 210-230 (1+J+1)
230 IF (I-1) GO TO 250-280
240 GOTO 210-230 (1+J+2)
250 IF (I-1) GO TO 270-280
260 GOTO 210-230 (1+J+2)
270 GOTO 210-230 (1+J+2)
280 GOTO 210-230 (1+J+2)

```

135 C REESTIMACION DE NIVELES

```

C
C
290 E=0
300 GOTO 310-320
310 GOTO 310-320
320 GOTO 310-320
330 GOTO 310-320
340 GOTO 310-320
350 GOTO 310-320
360 GOTO 310-320
370 GOTO 310-320
380 GOTO 310-320
390 GOTO 310-320
400 GOTO 310-320
410 GOTO 310-320
420 GOTO 310-320
430 GOTO 310-320
440 GOTO 310-320
450 GOTO 310-320
460 GOTO 310-320
470 GOTO 310-320
480 GOTO 310-320
490 GOTO 310-320
500 GOTO 310-320
510 GOTO 310-320
520 GOTO 310-320
530 GOTO 310-320
540 GOTO 310-320
550 GOTO 310-320
560 GOTO 310-320
570 GOTO 310-320
580 GOTO 310-320
590 GOTO 310-320
600 GOTO 310-320
610 GOTO 310-320
620 GOTO 310-320
630 GOTO 310-320
640 GOTO 310-320
650 GOTO 310-320
660 GOTO 310-320
670 GOTO 310-320
680 GOTO 310-320
690 GOTO 310-320
700 GOTO 310-320
710 GOTO 310-320
720 GOTO 310-320
730 GOTO 310-320
740 GOTO 310-320
750 GOTO 310-320
760 GOTO 310-320
770 GOTO 310-320
780 GOTO 310-320
790 GOTO 310-320
800 GOTO 310-320
810 GOTO 310-320
820 GOTO 310-320
830 GOTO 310-320
840 GOTO 310-320
850 GOTO 310-320
860 GOTO 310-320
870 GOTO 310-320
880 GOTO 310-320
890 GOTO 310-320
900 GOTO 310-320
910 GOTO 310-320
920 GOTO 310-320
930 GOTO 310-320
940 GOTO 310-320
950 GOTO 310-320
960 GOTO 310-320
970 GOTO 310-320
980 GOTO 310-320
990 GOTO 310-320

```

100 C IMPRESION DE RESULTADOS

```

C
200 WRITE (6,3) (TIME,ITER)
310 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
320 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
330 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
340 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
350 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
360 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
370 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
380 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
390 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
400 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
410 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
420 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
430 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
440 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
450 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
460 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
470 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
480 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
490 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
500 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
510 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
520 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
530 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
540 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
550 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
560 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
570 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
580 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
590 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
600 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
610 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
620 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
630 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
640 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
650 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
660 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
670 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
680 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
690 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
700 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
710 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
720 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
730 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
740 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
750 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
760 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
770 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
780 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
790 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
800 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
810 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
820 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
830 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
840 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
850 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
860 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
870 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
880 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
890 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
900 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
910 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
920 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
930 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
940 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
950 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
960 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
970 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
980 PRINT (6,3) (TIME,ITER)
990 PRINT (6,3) (TIME,ITER)

```

SYMBOLIC REFERENCE MAP (M=1)

ENTRY POINTS
810 END

VARIABLE	ON	TYPE	RELLOCATION	ADDRESS	MODE	REAL	ARRAY
4715	AA	REAL		4715	H	REAL	ARRAY
4716	AA	REAL		4716	CC	REAL	
4717	AA	REAL		4717	DD	REAL	
4718	DELTA	REAL		4718	EE	REAL	ARRAY
4719	DELTA	REAL		4719	FF	REAL	ARRAY
4720	DELTA	REAL		4720	GG	REAL	ARRAY
4721	DELTA	REAL		4721	HH	REAL	ARRAY
4722	DELTA	REAL		4722	II	REAL	ARRAY
4723	DELTA	REAL		4723	JJ	REAL	ARRAY
4724	DELTA	REAL		4724	KK	REAL	ARRAY
4725	DELTA	REAL		4725	LL	REAL	ARRAY
4726	DELTA	REAL		4726	MM	REAL	ARRAY
4727	DELTA	REAL		4727	NN	REAL	ARRAY
4728	DELTA	REAL		4728	OO	REAL	ARRAY
4729	DELTA	REAL		4729	PP	REAL	ARRAY
4730	DELTA	REAL		4730	QQ	REAL	ARRAY
4731	DELTA	REAL		4731	RR	REAL	ARRAY
4732	DELTA	REAL		4732	SS	REAL	ARRAY
4733	DELTA	REAL		4733	TT	REAL	ARRAY
4734	DELTA	REAL		4734	UU	REAL	ARRAY
4735	DELTA	REAL		4735	VV	REAL	ARRAY
4736	DELTA	REAL		4736	WW	REAL	ARRAY
4737	DELTA	REAL		4737	XX	REAL	ARRAY
4738	DELTA	REAL		4738	YY	REAL	ARRAY
4739	DELTA	REAL		4739	ZZ	REAL	ARRAY
4740	DELTA	REAL		4740	AA	REAL	ARRAY
4741	DELTA	REAL		4741	BB	REAL	ARRAY
4742	DELTA	REAL		4742	CC	REAL	ARRAY
4743	DELTA	REAL		4743	DD	REAL	ARRAY
4744	DELTA	REAL		4744	EE	REAL	ARRAY
4745	DELTA	REAL		4745	FF	REAL	ARRAY
4746	DELTA	REAL		4746	GG	REAL	ARRAY
4747	DELTA	REAL		4747	HH	REAL	ARRAY
4748	DELTA	REAL		4748	II	REAL	ARRAY
4749	DELTA	REAL		4749	JJ	REAL	ARRAY
4750	DELTA	REAL		4750	KK	REAL	ARRAY
4751	DELTA	REAL		4751	LL	REAL	ARRAY
4752	DELTA	REAL		4752	MM	REAL	ARRAY
4753	DELTA	REAL		4753	NN	REAL	ARRAY
4754	DELTA	REAL		4754	OO	REAL	ARRAY
4755	DELTA	REAL		4755	PP	REAL	ARRAY
4756	DELTA	REAL		4756	QQ	REAL	ARRAY
4757	DELTA	REAL		4757	RR	REAL	ARRAY
4758	DELTA	REAL		4758	SS	REAL	ARRAY
4759	DELTA	REAL		4759	TT	REAL	ARRAY
4760	DELTA	REAL		4760	UU	REAL	ARRAY
4761	DELTA	REAL		4761	VV	REAL	ARRAY
4762	DELTA	REAL		4762	WW	REAL	ARRAY
4763	DELTA	REAL		4763	XX	REAL	ARRAY
4764	DELTA	REAL		4764	YY	REAL	ARRAY
4765	DELTA	REAL		4765	ZZ	REAL	ARRAY
4766	DELTA	REAL		4766	AA	REAL	ARRAY
4767	DELTA	REAL		4767	BB	REAL	ARRAY
4768	DELTA	REAL		4768	CC	REAL	ARRAY
4769	DELTA	REAL		4769	DD	REAL	ARRAY
4770	DELTA	REAL		4770	EE	REAL	ARRAY
4771	DELTA	REAL		4771	FF	REAL	ARRAY
4772	DELTA	REAL		4772	GG	REAL	ARRAY
4773	DELTA	REAL		4773	HH	REAL	ARRAY
4774	DELTA	REAL		4774	II	REAL	ARRAY
4775	DELTA	REAL		4775	JJ	REAL	ARRAY
4776	DELTA	REAL		4776	KK	REAL	ARRAY
4777	DELTA	REAL		4777	LL	REAL	ARRAY
4778	DELTA	REAL		4778	MM	REAL	ARRAY
4779	DELTA	REAL		4779	NN	REAL	ARRAY
4780	DELTA	REAL		4780	OO	REAL	ARRAY
4781	DELTA	REAL		4781	PP	REAL	ARRAY
4782	DELTA	REAL		4782	QQ	REAL	ARRAY
4783	DELTA	REAL		4783	RR	REAL	ARRAY
4784	DELTA	REAL		4784	SS	REAL	ARRAY
4785	DELTA	REAL		4785	TT	REAL	ARRAY
4786	DELTA	REAL		4786	UU	REAL	ARRAY
4787	DELTA	REAL		4787	VV	REAL	ARRAY
4788	DELTA	REAL		4788	WW	REAL	ARRAY
4789	DELTA	REAL		4789	XX	REAL	ARRAY
4790	DELTA	REAL		4790	YY	REAL	ARRAY
4791	DELTA	REAL		4791	ZZ	REAL	ARRAY
4792	DELTA	REAL		4792	AA	REAL	ARRAY
4793	DELTA	REAL		4793	BB	REAL	ARRAY
4794	DELTA	REAL		4794	CC	REAL	ARRAY
4795	DELTA	REAL		4795	DD	REAL	ARRAY
4796	DELTA	REAL		4796	EE	REAL	ARRAY
4797	DELTA	REAL		4797	FF	REAL	ARRAY
4798	DELTA	REAL		4798	GG	REAL	ARRAY
4799	DELTA	REAL		4799	HH	REAL	ARRAY
4800	DELTA	REAL		4800	II	REAL	ARRAY

En la figura 5.13 se presenta el listado del programa y en la figura 5.14 las tarjetas de datos.

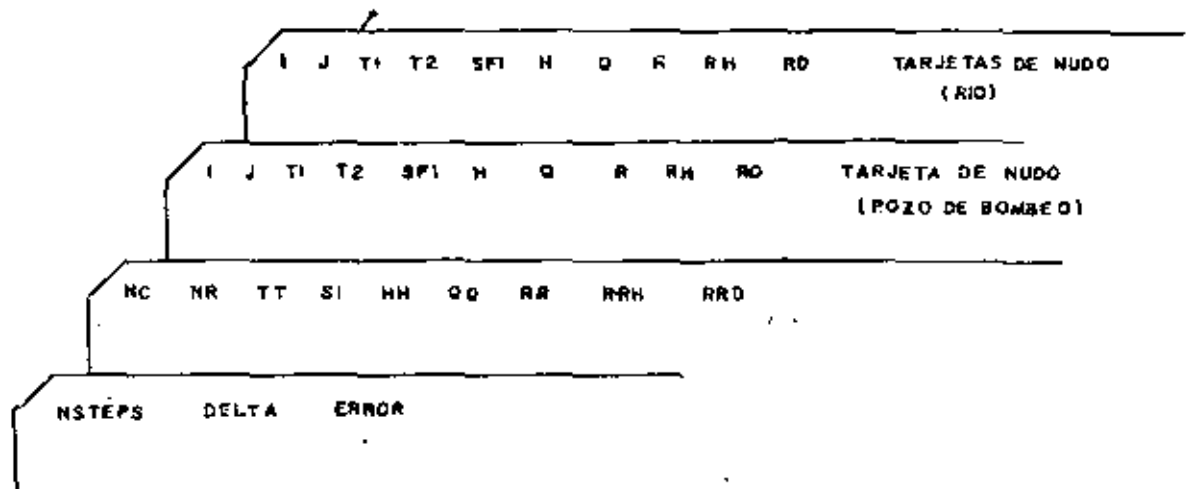


FIGURA 5.14

5.2.5 Paso de acuífero confinado a libre

Supondremos que el espesor desecado del acuífero es despreciable comparado con el espesor total del mismo. En la figura 5.15 se muestra un esquema de este tipo de problema

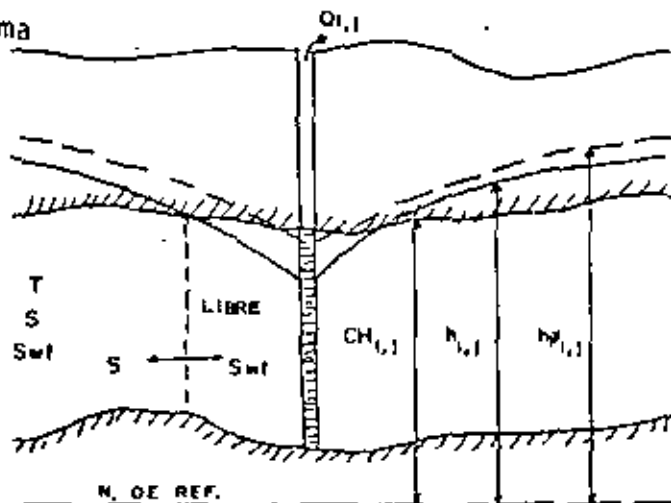


FIGURA 5.15

Entonces debemos usar un coeficiente de almacenamiento para cuando es libre, por lo tanto

$$SF2_{i,j} = S_{wt} \Delta x \Delta y \dots \dots \dots (5.15)$$

donde:

$SF2_{i,j}$ = factor de almacenamiento para el nudo de coordenadas i,j del modelo en m^3/m

S_{wt} = coeficiente de almacenamiento en condiciones de acuífero libre para el nudo i,j adimensional.

En las figuras 5.16 y 5.17 se muestran el listado del programa y las tarjetas de datos, respectivamente

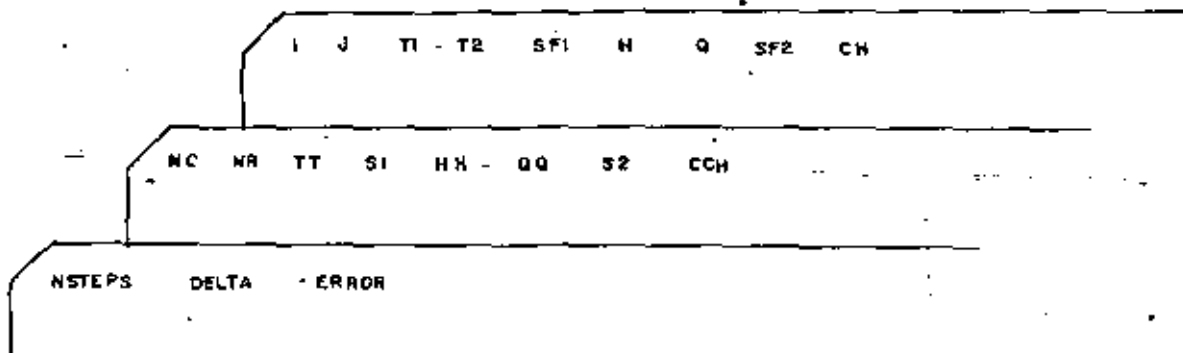


FIGURA 5.17

C ILLINOIS STATE WATER SURVEY
C PROGRAMA BASICO DE SIMULACION DE ACUIFEROS

C DEFINICION DE VARIABLES
C H0(I,J)-----NIVELES PIEZOMETRICOS INICIALES
C EN EL NUDO (I,J)
C H1(I,J)-----NIVELES PIEZOMETRICOS AL FINAL DEL
C INCREMENTO DE TIEMPO (M.)
C SF2(I,J)-----FACTOR DE ALMACENAMIENTO P70A
C CONDICIONES DE ACUIFERO LIBRE
C (13/DIA)
C Q(T,J)-----CAUDALES DE BOMBEO CONSTANTES(M3/DIA)
C T1(I,J,1)-----TRANSMISIVIDAD DEL ACUIFERO ENTRE
C LOS MUROS 1+J Y 1+J+1 (M3/DIA/M)
C T2(I,J,2)-----TRANSMISIVIDAD DEL ACUIFERO ENTRE
C LOS MUROS 1+J Y 1+J (M3/DIA/M)
C AA,UB,CC,DD-----COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES
C DE BALANCE HIDRICO
C NR-----NO. DE FILAS DEL MODELO
C NC-----NO. DE COLUMNAS DEL MODELO
C NSTEPS-----NO. DE INCREMENTOS DE TIEMPO
C DELTA-----INCREMENTO DE TIEMPO (DIAS)
C HR,SI,OT,TT-----VALORES COMUNES
C I-----NUMERO DE COLUMNA
C J-----NUMERO DE FILA
C CH(I,J)-----ELEVACION DE LA PARTE SUPERIOR DEL
C ACUIFERO (M)

DIMENSION H(50,50),H0(50,50),
SF1(50,50),Q(50,50),T(50,50,2),
Z0(50,0),G(50),DL(50,50)
G,SF2(50,50),CH(50,50)

C ELIMINACION DE POSIBLES UNDERFLOWS.

CALL ERRSET(204,256,-1,1)

C LECTURA DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y
C VALORES COMUNES

READ(5,10)NSTEPS,DELTA,F000R,
10,CC,RR,TT,SI,HH,DD,S2,CCP
10 FORMAT(I6,2F6.0/2I6,4F6.0,19X,2F6.0)

C LLENADO DE LAS MATRICES CON LOS VALORES COMUNES

DO 20 I=1,NC
DO 20 J=1,NR
T(I,J,1)=TT
T(I,J,2)=TT
H(I,J)=H0
H0(I,J)=H0
S(I,J)=G2

```
2,SF2(I,J),CH(I,J)
IF (OFIS) 50+30
40 FORMAT(2I3,2F6.0,2F4.0,2F4.0,1BX,2F4.0)
```

```
C COMIENZO DE LA SIMULACION
```

```
50 TIME=0.0
DO 320 ISTEP=1,NSTEPS
TIME=TIME+DELTA
```

```
C PREDICCIÓN DE NIVELES PARA EL SIGUIENTE
C INTERVALO DE TIEMPO
```

```
53 DO 70 I=1,NC
DO 70 J=1,NR
D=H(I,J)-HO(I,J)
HO(I,J)=H(I,J)
F=1.0
IF (DL(I,J).EQ.0.0) GO TO 60
IF (ISTEP.GT.2) F=D/DL(I,J)
IF (F.GT.5) F=5.0
IF (F.LT.0.0) F=0.0
60 DL(I,J)=D
70 H(I,J)=H(I,J)+D*F
```

```
C REFINAMIENTO DE LAS ESTIMACIONES POR
C EL METODO IADI
```

```
ITER=0
80 E=0.0
ITER=ITER+1
```

```
C CALCULO POR COLUMNAS
```

```
DO 190 I=1,NC
I=I
IF (MOD(ITER+1,2).EQ.1) I=NC-I+1
DO 170 J=1,NR
```

```
C CALCULO DE LOS VECTORES W Y C
```

```
C CONTROL DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO
```

```
S=SF1(I,J)
IF (H(I,J).LT.CH(I,J)) S=SF2(I,J)
DQ=HO(I,J)*S/DELTA-Q(I,J)
IF (MOD(I,J)-CH(I,J)) * (H(I,J)-
LOH(I,J).LT.0.0) DQ=DQ+(HO(I,J)-
Z=CH(I,J))*(SF1(I,J)-SF2(I,J))
S/DELTA
DQ=S/DELTA
AA=0.0
CC=0.0
IF (I-1) 90,100,90
90 AA=T(I,J-1)
BB=H(I,J-1)
100 IF (I-N) 110,120,110
110 CC=T(I,1)
```

```

30 BB=BB+T(I-1,J+2)
   DD=DD+H(I-1,J)*T(I-1,J+2)
40 IF(I=NC)190,190,190
50 BB=BB+T(I,J+2)
   DD=DD+H(I+1,J)*T(I,J+2)
60 W=DD-AA*G(I-1)
   G(I)=CC/W
170 G(I)=(DD-AA*G(I-1))/W

```

PEESTIMACION DE NIVELES

```

E=E+ABS(H(I, NR)-G(NR))
H(I, NR)=G(NR)
NR=NR-1
180 HA=G(N) - G(N) * H(I, N+1)
E=E+ABS(HA-H(I, N))
H(I, N)=HA
N=N-1
IF(N)190,190,190
190 CONTINUE

```

CALCULOS POR FILAS

```

DO 300 JJ=1, NR
J=JJ
IF(MOD(ISTEP+ITER, 2).EQ.1) J=NR-J+1
DO 200 I=1, NC

```

CONTROL DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

```

S=SF1(I, J)
IF(H(I, J).LT.CH(I, J))S=SF2(I, J)
DS=S/DELTA
CU=HO(I, J)*S/DELTA-O(I, J)
IF(HO(I, J)-CH(I, J))*H(I, J)-
1*CH(I, J).LT.0.0)DD=DD+(HO(I, J)
2-CH(I, J))*S/DELTA
3/DELTA
AA=0.0
CC=0.0
IF(I=1)200, 210, 200

```

```

200 BB=BB+T(I, J-1, 1)
   DD=DD+H(I, J-1)*T(I, J-1, 1)
210 IF(I=NR)220, 230, 220
220 DD=DD+H(I, J+1)*T(I, J+1, 1)
   BB=BB+T(I, J+1, 1)
230 IF(I=1)240, 250, 240
240 BB=BB+T(I-1, J, 2)
   AA=T(I-1, J, 2)
250 IF(I=NC)260, 270, 260
260 DD=DD+H(I, J, 2)
   CC=T(I, J, 2)
270 W=DD-AA*G(I-1)
   G(I)=CC/W
280 G(I)=(DD-AA*G(I-1))/W

```

PEESTIMACION DE NIVELES

```

E=E+ABS(H(NC, J)-G(NC))
H(NC, J)=G(NC)
NC=NC-1
290 HA=G(N) - G(N) * H(N, J+1)
E=E+ABS(HA-H(N, J))
H(N, J)=HA

```

```
300 CONTINUE  
IF(E.GT.E(POR)) GO TO 40
```

```
IMPRESION DE RESULTADOS
```

```
WRITE(5,310) TIME*P*ITER  
310 FORMAT(3H2TIEMPO=,F6.2///,F20.7,I5)  
DELTA=DELTA*1.2  
DO 330 J=1,NR  
320 WRITE(6,330) J, (H1+J), I=1,NC  
330 FORMAT(15,5X,10F10.4/(12X,10F10.4))
```

```
STOP  
END
```

5.2.6

Acuífero libre

En la figura 5.18 se observa este tipo de acuífero

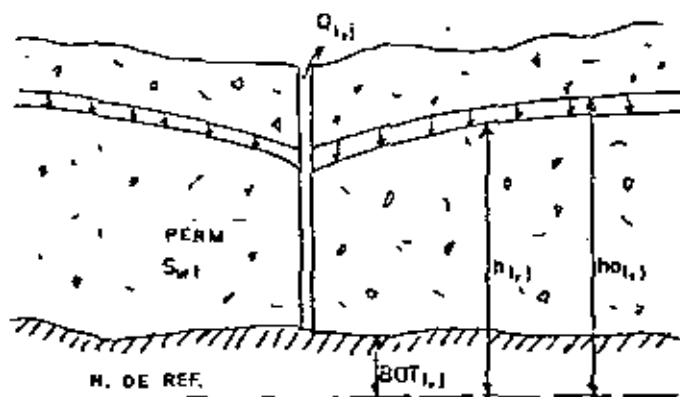


FIGURA 5.18

De la figura 5.19 podemos inferir lo siguiente:

$$T_{i,j,2} = PERM_{i,j,2} \sqrt{(h_{i,j} - BOT_{i,j})(h_{i+1,j} - BOT_{i+1,j})} \dots (5.16)$$

donde:

$T_{i,j,2}$ = transmisibilidad del acuífero en el volumen orientado comprendido entre los nudos i,j e $i+1,j$

$PERM_{i,j,2}$ = permeabilidad del acuífero en el volumen orientado comprendido entre los nudos i,j e $i+1, j$.

Análogamente obtenemos la transmisibilidad entre los nudos i,j e $i,j+1$.

$$T_{i,j,1} = \text{PERM}_{i,j,1} \sqrt{(h_{i,j} - \text{BOT}_{i,j})(h_{i,j+1} - \text{BOT}_{i,j+1})} \dots \dots \dots (5.17)$$

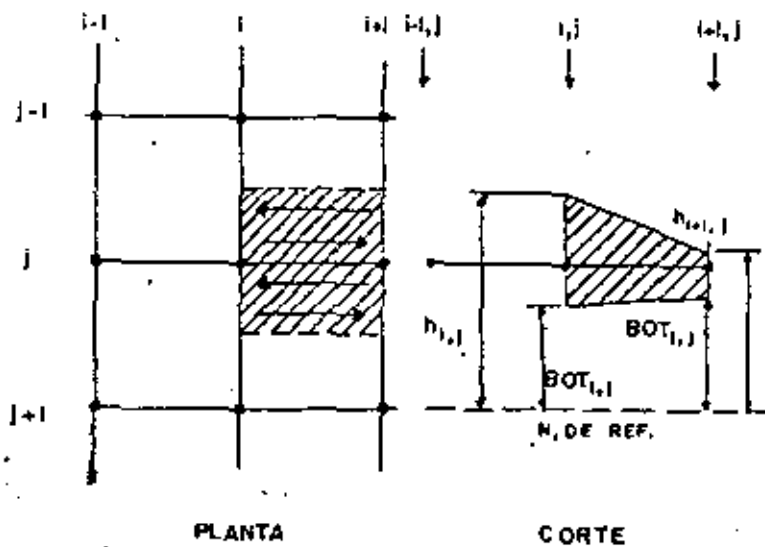


FIGURA 5.19

En la figura 5.20 y 5.21, respectivamente, se muestran el listado y la forma de meter las tarjetas de datos.

```

1      PROGRAM IAD(IINPUT,OUTPUT,TAPE5=INPUT,TAPE6=OUTPUT)
C ILLINOIS STATE WATER SURVEY
C PROGRAMA BASICO DE SIMULACION DE ACUIFEROS
C
5 C DEFINICION DE VARIABLES
C HO(I,J)-----NIVELES PIEZOMETRICOS INICIALES
C              EN EL MODO (I,J)
C H(I,J)-----NIVELES PIEZOMETRICOS AL FINAL DEL
C              INCREMENTO DE TIEMPO (M.)
10 C SF2(I,J)----FACTOR DE ALMACENAMIENTO PARA
C              CONDICIONES DE ACUIFERO LIBRE (M3/M)
C Q(I,J)-----CAUDALES DE BOMBEO CONSTANTE (M3/DIA)
C T(I,J,1)----TRANSMISIVIDAD DEL ACUIFERO ENTRE
C              LOS NUDOS I,J E I,J+1 (M3/DIA/M)
15 C T(I,J,2)---TRANSMISIVIDAD DEL ACUIFERO ENTRE
C              LOS NUDOS I,J E I+1,J (M3/DIA/M)
C AA,BA,CA,DA-COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES
C              DE BALANCE HIDRICO
C NR-----NO. DE FILAS DEL MODELO
20 C NC-----NO. DE COLUMNAS DEL MODELO
C NSTEPS-----NO. DE INCREMENTOS DE TIEMPO
C DELTA-----INCREMENTO DE TIEMPO (DIAS)
C MH,S1,CO,TT-VALORES COMUNES
C I-----NUMERO DE COLUMNA
25 C J-----NUMERO DE FILA
C PERM(I,J,1)-PERMEABILIDAD DEL ACUIFERO ENTRE
C              I,J Y I,J+1 (M3/DIA/M2)
C              I,J Y I+1,J (M3/DIA/M2)
C HGT(I,J)----COTA DEL FONDO DEL ACUIFERO EN M.
30 C
C
C
C
35 C DIMENSION H(50,50),HO(50,50),
C SF2(50,50),Q(50,50),T(50,50,2),
C TA(50),CA(50),DA(50,50)
C BA,PERM(50,50,2),HGT(50,50)
C
C ELIMINACION DE POSIBLES UNDERFLOWS.
40 C
C CALL FRPSET(200,256,-1,1)
C
C
C
45 C LECTURA DE LAS TARJETAS DE PARAMETROS Y
C VALORES COMUNES
C
C READ(5,10)NSTEPS,DELTA,ERROR,
50 INC,BA,TT,MH,CO,CA,PP,ROT
10 FORMAT(15,2F6.0,2F6.1F6.0,6X,2F6.0
14)PX,1F6.0,6X,2F6.0)
C
C
C LLENADO DE LAS MATRICES CON LOS VALORES COMUNES
55 C
C DO 20, I=1,NC

```



```

60 SF2(I,J)=S2
    PFM(I,J,1)=PP
    PFM(I,J,2)=PP
    BOT(I,J)=BOTI
    T(I,J,1)=TI
    T(I,J,2)=TI
65 H(I,J)=H4
    HO(I,J)=H4
20 Q(I,J)=Q0
C
C LEYENDA DE LAS TARJETAS DE NUDO
C
70 30 READ(5,40)I,J,T(I,J,1),
    IT(I,J,2)+H(I,J)+Q(I,J),
    2SF2(I,J)+PFM(I,J,1)+PERM(I,J,2)+BOT(I,J)
    IF(FDF(5))50,30
75 40 FORMAT(2I3,2F5.0,4X,1F4.0,1F6.0,16X,1F6.0,6X,3F6.0)
C
C COMIENZO DE LA SIMULACION
C
80 50 TIME=0.0
    DO 320 ISTEP=1,NSTEPS
    TIME=TIME+DELTA
C
C PREDICCION DE NIVELES PARA EL SIGUIENTE
C INTERVALO DE TIEMPO
C
85 53 DO 70 I=1,NC
    DO 70 J=1,NR
    D=H(I,J)+HO(I,J)
    HO(I,J)=H(I,J)
    F=1.0
90 IF(DL(I,J)-EQ,0.0)GO TO 60
    IF(ISTEP.GT.2)F=D/DL(I,J)
    IF(F.GT.5)F=5.0
    IF(F.LT.0.0)F=0.0
60 DL(I,J)=D
95 H(I,J)=H(I,J)+D*F
    70 IF(H(I,J).LE.POT(I,J))H(I,J)=BOT(I,J)+0.01
C
C REFINAMIENTO DE LAS ESTIMACIONES POR
C EL METODO 1401
100 C
    ITER=0
    80 E=0.0
    ITER=ITER+1
C
105 C
    DO 83 I=1,NC
    DO 83 J=1,NR
    IF(I.LT.NC)IT(I,J,2)=PERM(I,J,2)*SORT((H(I,J)-
110 1BOT(I,J))*(H(I+1,J)-BOT(I+1,J)))
    83 IF(IJ.LT.NR)IT(I,J,1)=PERM(I,J,1)*SORT((H(I,J)-
    1BOT(I,J))*(H(I,J+1)-BOT(I,J+1)))
C
C CALCULO POR COLUMNAS
C
    DO 100 II=1,NC

```

115

```

I=I1
IF (MOD(I,STEP+1)EQ.2) I=NC-I+1
DO 170 J=1, NR

```

C

120

C

```

CÁLCULO DE LOS VECTORES B Y G

```

C

```

BA=SF2(I,J)/DELTA
DB=40(I,J)+SF2(I,J)/DELTA-Q(I,J)
AA=0.0
CC=0.0

```

125

```

IF (J-1) 90, 100, 90

```

```

90 AA=-T(I,J-1)

```

```

BB=PP+T(I,J-1)

```

```

100 IF (J-NP) 110, 120, 110

```

```

110 CC=-T(I,J+1)

```

```

BB=BB-T(I,J+1)

```

130

```

120 IF (I-1) 130, 140, 130

```

```

130 BB=BB-T(I-1,J,2)

```

```

DD=DD+(I-1)*T(I-1,J,2)

```

```

140 IF (I-NC) 150, 140, 150

```

```

150 BB=BB-T(I,J,2)

```

```

DD=DD+(I+1)*T(I,J,2)

```

135

```

160 AA=AA+2*9(I,J-1)

```

```

BB=CC/4

```

```

170 G(I)=100-2*G(J-1)/W

```

140

C

C

```

REFINIMACION DE NIVELES

```

C

```

E=ABS(H(I+NP)-G(NR))

```

```

H(I+NP)=G(NR)

```

```

N=NP-1

```

145

```

180 HA=G(N)-R(N)*H(I,N+1)

```

```

E=ABS(HA-H(I,N))

```

```

H(I,N)=HA

```

```

N=N-1

```

150

```

IF (N.GT.0) GO TO 180

```

```

DO 190 N=1, NR

```

```

IF (H(I,N).GT.ROT(I,N)) GO TO 190

```

```

E=ROT(I,N)+0.01-H(I,N)

```

```

H(I,N)=ROT(I,N)+0.01

```

155

```

190 CONTINUE

```

C

C

```

CONTROL DE LA TRANSMISIVIDAD

```

C

```

DO 193 J=1, NR

```

```

DO 193 I=1, NC

```

```

IF (I.LT.NC) T(I,J,2)=PERM(I,J,2)*SQRT((H(I,J)-

```

```

1ROT(I,J))*((H(I+1,J)-ROT(I+1,J)))

```

```

193 IF (J.LT.NP) T(I,J,1)=PERM(I,J,1)*SQRT((H(I,J)-

```

```

1ROT(I,J))*((H(I,J+1)-ROT(I,J+1)))

```

165

C

C

```

CÁLCULOS POR FILAS

```

```

DO 200 J=1, NR

```

```

J=J1

```

```

IF (MOD(I,STEP+1)EQ.2) I=NC-I+1

```

```

      DD=MO(I,J)*SF2(I,J)/DELTA-Q(I,J)
      AA=0.0
      CC=0.0
175      IF(J-1)200,210,200
      200 RR=RR+T(I,J-1,1)
      DD=DD+M(I,J-1)*T(I,J-1,1)
      210 IF(J-NC)220,230,220
      220 DD=DD+M(I,J-1)*T(I,J,1)
      RR=RR+T(I,J,1)
180      230 IF(I-1)240,250,240
      240 RR=RR+T(I-1,J,2)
      AA=+T(I-1,J,2)
      250 IF(I-NC)260,270,260
185      260 RR=RR+T(I,J,2)
      CC=-T(I,J,2)
      270 W=RR-AA*B(I-1)
      B(I)=CC/W
190      280 G(I)=((DD-AA*G(I-1))/W)
C
C      REESTIMACION DE NIVELES
C
      E=F+ABS(M(NC,J)-G(NC))
      M(NC,J)=G(NC)
195      N=N-1
      200 MA=G(N)-R(N)*M(N+1,J)
      E=F+ABS(M(N,J)-MA)
      M(N,J)=MA
      N=N-1
      200 IF(N.GT.0) 60 TO 290
      DO 300 N=1,NC
      IF(M(N,J).GT.90T(N,J)) 60 TO 300
      E=F+ABS(M(N,J)+0.01-H(N,J))
      H(N,J)=90T(N,J)+0.01
205      300 CONTINUE
      IF(E.GT.EPPCP) 60 TO 60
C
C      IMPRESION DE RESULTADOS
C
210      WRITE(4,310)TIME,F,ITER
      310 FORMAT(5H7TIEMPO=,F6.2///,F20.7,15)
      DELTA=DELTA*1.2
      DO 320 J=1,NR
215      320 WRITE(4,330)J,(M(I,J),I=1,NC)
      330 FORMAT(15,4X,10F10.4/(12X,10F10.4))
C
      STOP
      END

```

SYMBOLIC REFERENCE MAP (R=1)

ENTRY POINTS
6136 1401

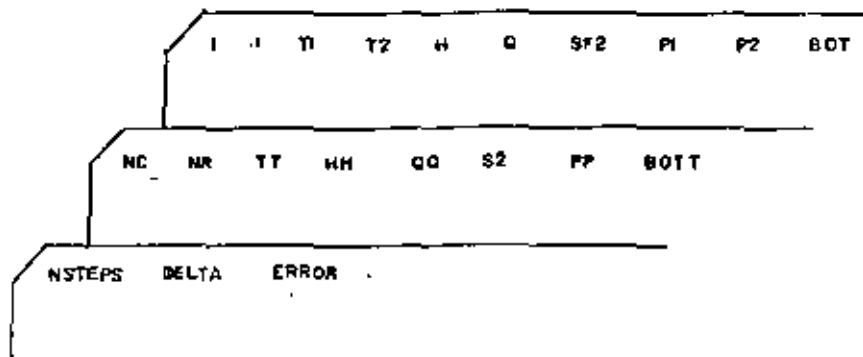


FIGURA 5.21

5.3

Ejemplos, de cada uno de los casos anteriores, a resolver en

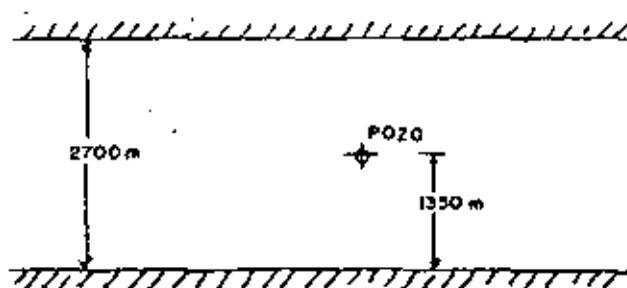
clase.

EJEMPLO No. 1

Se supone un acuífero confinado, iniforme con las siguientes características:

$$T = 450 \text{ m}^2/\text{día}, \quad S = 10^{-2}$$

Se sugiere el empleo de una malla cuadrada de 300 m de lado.

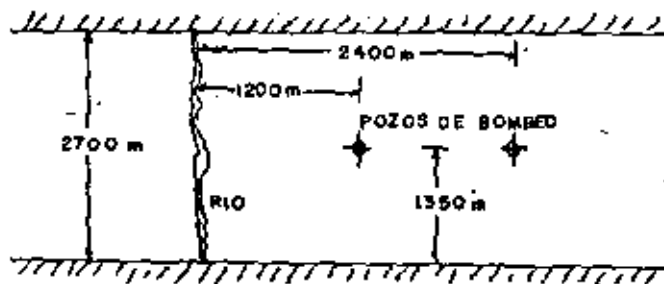


Cálculo:

- El descenso en el pozo después de bombear durante 6 meses con un caudal de $1\ 900\text{ m}^3/\text{día}$.
- Zona afectada por el cono de bombeo en las condiciones supuestas en (a) y (se consideran afectadas las zonas de descensos mayores de 1 cm)
- Radio que debería tener el pozo para que, el descenso obtenido en (a) con el modelo, coincidiera con el real.
- Descenso real, si el pozo tuviera 200 mm de radio.

EJEMPLO No. 2

Se tiene un acuífero confinado surcado perpendicularmente por un río, como se muestra en la figura, se instalan dos pozos de bombeo,



Se supone que el acuífero es homogéneo e isótropo, que el río penetra totalmente en el acuífero y que en ningún momento queda libre. El nivel del río coincide con el nivel inicial del acuífero. Los datos del acuífero son:

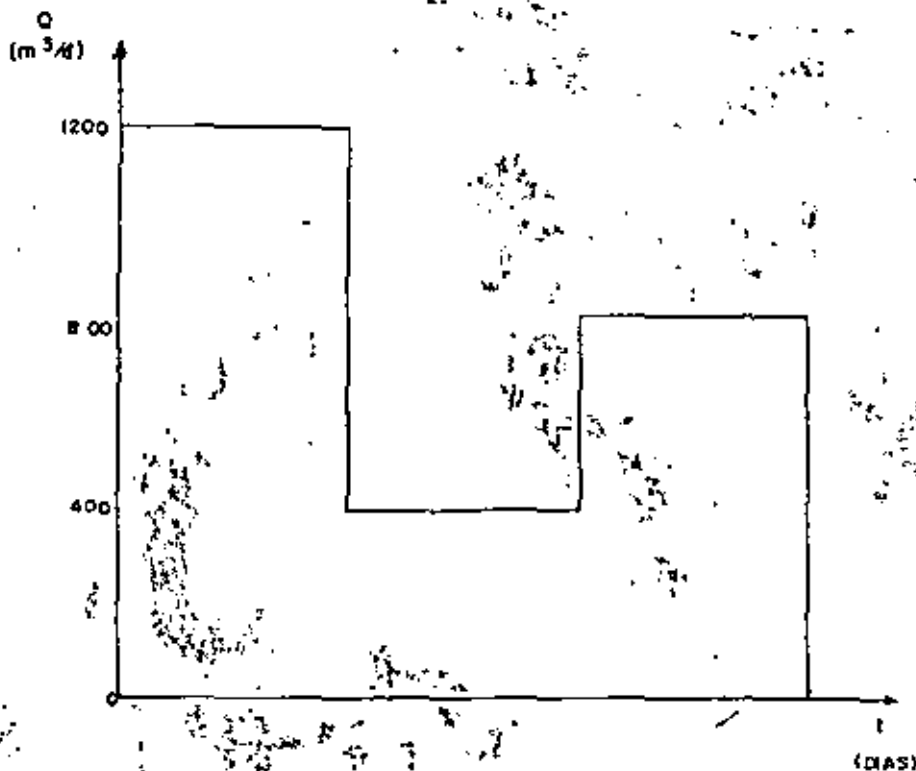
$$T = 620\text{ m}^2/\text{día}, \quad S = 10^{-2}$$

Se sugiere emplear una malla cuadrada de 300 m de lado. Suponiendo que cada pozo extrae un caudal constante de $1\ 900\ \text{m}^3/\text{día}$, calcular:

- El descenso en cada uno de los pozos y en el punto medio entre los mismos al cabo de 6 meses de bombeo continuo, en ambos pozos.
- La máxima extensión del cono de bombeo
- Tiempo que tarda en alcanzar el régimen estacionario.

EJEMPLO No. 3

Para el ejemplo No. 2, calcular el descenso en el pozo al final del siguiente esquema de bombeo.



EJEMPLO No. 4

En la figura (a) se muestra un acuífero confinado, y en la figura (b) se muestra la estructura vertical del mismo acuífero.

Se supone que el acuífero confinado y el acuífero son homogéneos e isotrópicos, que los niveles piezométricos iniciales en los dos acuíferos son iguales y que el acuífero superior no varía de nivel durante el bombeo.

Datos:

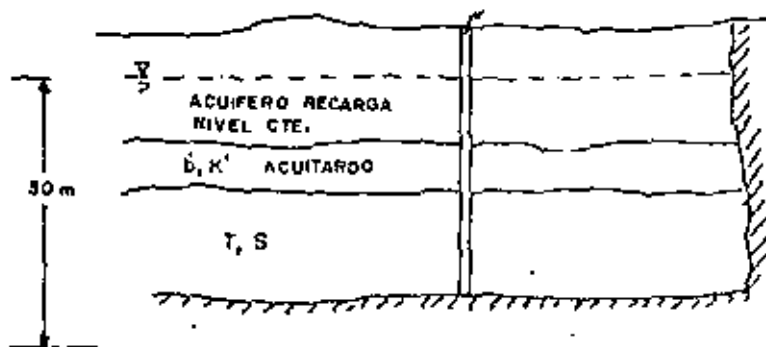
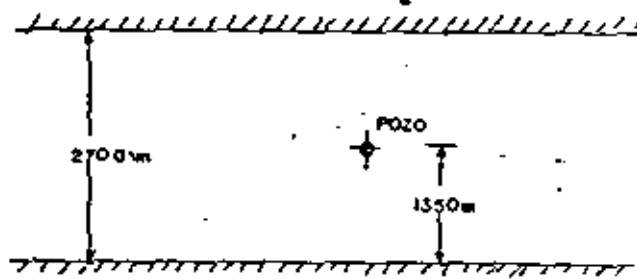
$$T = 620 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$S = 2 \times 10^{-3}$$

$$K' = 7.6 \times 10^{-3} \text{ m/día}$$

$$b' = 3 \text{ m}$$

$$Q = 1\,900 \text{ m}^3/\text{día.}$$

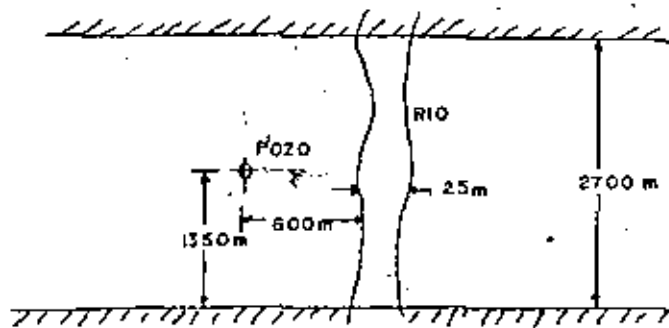


Calcular:

- Cuánto tiempo tarda en alcanzar el régimen estacionario
- Cuál es el descenso en el pozo y el descenso máximo en los bordes del acuífero
- Cuál es la máxima extensión del cono de bombeo.

EJEMPLO No. 5

En la siguiente figura se muestra un esquema del caso de recarga inducida



Datos del acuífero:

Nivel inicial del acuífero = 250 m (S.N.R.)

$T = 1\ 000\ m^2/día$

$S = 10^{-2}$

$P' = 2 \times 10^{-3}\ m/seg$

$m' = 0.2\ m$

Nivel inicial del río = 250 m (S.N.R.)

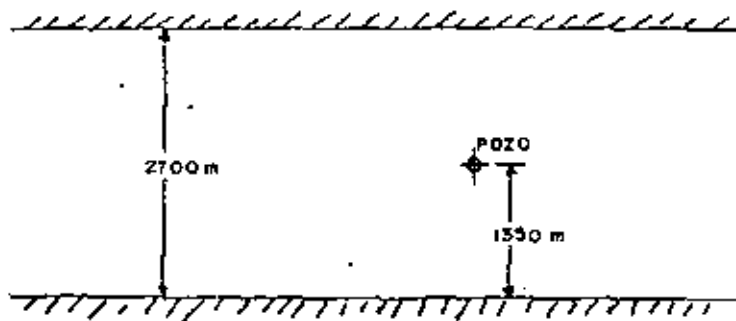
Nivel del fondo del río = 249.5 m (S.N.R.)

Calcular:

- El descenso en el pozo al final de 30 días de bombeo constante con un caudal de $4\,000\text{ m}^3/\text{día}$
- Cuántos nudos del acuífero coincidentes con el río alcanzan el punto de máximo gradiente hidráulico
- ¿Ha alcanzado el sistema acuífero-río el régimen estacionario al final de los 30 días?

EJEMPLO No. 6

Tenemos un acuífero libre como se muestra en la siguiente figura



Datos del acuífero:

$$T = 600\text{ m}^2/\text{día (inicialmente)}$$

$$S = 0.1$$

$$K = 40\text{ m/día}$$

Espesor saturado inicial = 15 m

Elevación del fondo del acuífero = 3 m (S.N.R.)

Calcular:

- a) El descenso en el pozo de bombeo al final de 30 días, con un caudal de 3 800 $\text{m}^3/\text{día}$
- b) Dibujar un gráfico de niveles-tiempos para el pozo y tres puntos de observación situados a 300, 600 y 3 300 m.



centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS DE AGUA

SUBTERRANEA

Modelos de Acuíferos

Ing. Salvador Díaz Maldonado

agosto, 1980

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

1000	100	1	174
1000	100	2	300
1000	100	3	430
1000	100	4	560
1000	100	5	690
1000	100	6	820
1000	100	7	950
1000	100	8	1080

1000	100	1	174
1000	100	2	300
1000	100	3	430
1000	100	4	560
1000	100	5	690
1000	100	6	820
1000	100	7	950
1000	100	8	1080

1000	100	1	174
1000	100	2	300
1000	100	3	430
1000	100	4	560
1000	100	5	690
1000	100	6	820
1000	100	7	950
1000	100	8	1080

RESPOSTAS NUMÉRICAS
PRÁCTICA D. 5

1000	100	1	174	1000	100	1	174
1000	100	2	300	1000	100	2	300
1000	100	3	430	1000	100	3	430
1000	100	4	560	1000	100	4	560
1000	100	5	690	1000	100	5	690
1000	100	6	820	1000	100	6	820
1000	100	7	950	1000	100	7	950
1000	100	8	1080	1000	100	8	1080
1000	100	9	1210	1000	100	9	1210
1000	100	10	1340	1000	100	10	1340
1000	100	11	1470	1000	100	11	1470
1000	100	12	1600	1000	100	12	1600
1000	100	13	1730	1000	100	13	1730
1000	100	14	1860	1000	100	14	1860
1000	100	15	1990	1000	100	15	1990
1000	100	16	2120	1000	100	16	2120
1000	100	17	2250	1000	100	17	2250
1000	100	18	2380	1000	100	18	2380
1000	100	19	2510	1000	100	19	2510
1000	100	20	2640	1000	100	20	2640
1000	100	21	2770	1000	100	21	2770
1000	100	22	2900	1000	100	22	2900
1000	100	23	3030	1000	100	23	3030
1000	100	24	3160	1000	100	24	3160
1000	100	25	3290	1000	100	25	3290
1000	100	26	3420	1000	100	26	3420
1000	100	27	3550	1000	100	27	3550
1000	100	28	3680	1000	100	28	3680
1000	100	29	3810	1000	100	29	3810
1000	100	30	3940	1000	100	30	3940
1000	100	31	4070	1000	100	31	4070
1000	100	32	4200	1000	100	32	4200
1000	100	33	4330	1000	100	33	4330
1000	100	34	4460	1000	100	34	4460
1000	100	35	4590	1000	100	35	4590
1000	100	36	4720	1000	100	36	4720
1000	100	37	4850	1000	100	37	4850
1000	100	38	4980	1000	100	38	4980
1000	100	39	5110	1000	100	39	5110
1000	100	40	5240	1000	100	40	5240
1000	100	41	5370	1000	100	41	5370
1000	100	42	5500	1000	100	42	5500
1000	100	43	5630	1000	100	43	5630
1000	100	44	5760	1000	100	44	5760
1000	100	45	5890	1000	100	45	5890
1000	100	46	6020	1000	100	46	6020
1000	100	47	6150	1000	100	47	6150
1000	100	48	6280	1000	100	48	6280
1000	100	49	6410	1000	100	49	6410
1000	100	50	6540	1000	100	50	6540
1000	100	51	6670	1000	100	51	6670
1000	100	52	6800	1000	100	52	6800
1000	100	53	6930	1000	100	53	6930
1000	100	54	7060	1000	100	54	7060
1000	100	55	7190	1000	100	55	7190
1000	100	56	7320	1000	100	56	7320
1000	100	57	7450	1000	100	57	7450
1000	100	58	7580	1000	100	58	7580
1000	100	59	7710	1000	100	59	7710
1000	100	60	7840	1000	100	60	7840
1000	100	61	7970	1000	100	61	7970
1000	100	62	8100	1000	100	62	8100
1000	100	63	8230	1000	100	63	8230
1000	100	64	8360	1000	100	64	8360
1000	100	65	8490	1000	100	65	8490
1000	100	66	8620	1000	100	66	8620
1000	100	67	8750	1000	100	67	8750
1000	100	68	8880	1000	100	68	8880
1000	100	69	9010	1000	100	69	9010
1000	100	70	9140	1000	100	70	9140
1000	100	71	9270	1000	100	71	9270
1000	100	72	9400	1000	100	72	9400
1000	100	73	9530	1000	100	73	9530
1000	100	74	9660	1000	100	74	9660
1000	100	75	9790	1000	100	75	9790
1000	100	76	9920	1000	100	76	9920
1000	100	77	10050	1000	100	77	10050
1000	100	78	10180	1000	100	78	10180
1000	100	79	10310	1000	100	79	10310
1000	100	80	10440	1000	100	80	10440
1000	100	81	10570	1000	100	81	10570
1000	100	82	10700	1000	100	82	10700
1000	100	83	10830	1000	100	83	10830
1000	100	84	10960	1000	100	84	10960
1000	100	85	11090	1000	100	85	11090
1000	100	86	11220	1000	100	86	11220
1000	100	87	11350	1000	100	87	11350
1000	100	88	11480	1000	100	88	11480
1000	100	89	11610	1000	100	89	11610
1000	100	90	11740	1000	100	90	11740
1000	100	91	11870	1000	100	91	11870
1000	100	92	12000	1000	100	92	12000
1000	100	93	12130	1000	100	93	12130
1000	100	94	12260	1000	100	94	12260
1000	100	95	12390	1000	100	95	12390
1000	100	96	12520	1000	100	96	12520
1000	100	97	12650	1000	100	97	12650
1000	100	98	12780	1000	100	98	12780
1000	100	99	12910	1000	100	99	12910
1000	100	100	13040	1000	100	100	13040

Table with multiple columns of numerical data, likely representing financial or statistical records. Includes some text at the bottom left.

Table with multiple columns of numerical data, continuing the list of records. Includes some text at the bottom left.

Table with multiple columns of numerical data, continuing the list of records. Includes some text at the bottom left.

Table with multiple columns of numerical data, continuing the list of records. Includes some text at the bottom left.

NO.	DESCRIPCION	VALOR
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50

NO.	DESCRIPCION	VALOR
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50

NO.	DESCRIPCION	VALOR
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50

NO.	DESCRIPCION	VALOR
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50

EJEMPLO NO 1
(CATEGORIAS)

NO.	DESCRIPCION	VALOR
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50

101	207	STIVE	411	210	
102	208		412	211	TRUSTEE
103	209	INACTIVE	413	212	
104	210		414	213	
105	211		415	214	
106	212		416	215	

107	213	EXT REFS	417	216	
108	214		418	217	
109	215		419	218	
110	216		420	219	
111	217		421	220	
112	218		422	221	
113	219		423	222	
114	220		424	223	
115	221		425	224	
116	222		426	225	

PIEMPO N.º 2
NUMÉRICO

117	223		427	226	
118	224		428	227	
119	225		429	228	
120	226		430	229	
121	227		431	230	
122	228		432	231	
123	229		433	232	
124	230		434	233	
125	231		435	234	
126	232		436	235	
127	233		437	236	
128	234		438	237	
129	235		439	238	
130	236		440	239	
131	237		441	240	
132	238		442	241	
133	239		443	242	
134	240		444	243	
135	241		445	244	
136	242		446	245	
137	243		447	246	
138	244		448	247	
139	245		449	248	
140	246		450	249	
141	247		451	250	
142	248		452	251	
143	249		453	252	
144	250		454	253	
145	251		455	254	
146	252		456	255	
147	253		457	256	
148	254		458	257	
149	255		459	258	
150	256		460	259	
151	257		461	260	
152	258		462	261	
153	259		463	262	
154	260		464	263	
155	261		465	264	
156	262		466	265	
157	263		467	266	
158	264		468	267	
159	265		469	268	
160	266		470	269	
161	267		471	270	
162	268		472	271	
163	269		473	272	
164	270		474	273	
165	271		475	274	
166	272		476	275	
167	273		477	276	
168	274		478	277	
169	275		479	278	
170	276		480	279	
171	277		481	280	
172	278		482	281	
173	279		483	282	
174	280		484	283	
175	281		485	284	
176	282		486	285	
177	283		487	286	
178	284		488	287	
179	285		489	288	
180	286		490	289	
181	287		491	290	
182	288		492	291	
183	289		493	292	
184	290		494	293	
185	291		495	294	
186	292		496	295	
187	293		497	296	
188	294		498	297	
189	295		499	298	
190	296		500	299	
191	297		501	300	
192	298		502	301	
193	299		503	302	
194	300		504	303	
195	301		505	304	
196	302		506	305	
197	303		507	306	
198	304		508	307	
199	305		509	308	
200	306		510	309	

201	307		511	310	
202	308		512	311	
203	309		513	312	
204	310		514	313	
205	311		515	314	
206	312		516	315	
207	313		517	316	
208	314		518	317	
209	315		519	318	
210	316		520	319	
211	317		521	320	
212	318		522	321	
213	319		523	322	
214	320		524	323	
215	321		525	324	
216	322		526	325	
217	323		527	326	
218	324		528	327	
219	325		529	328	
220	326		530	329	
221	327		531	330	
222	328		532	331	
223	329		533	332	
224	330		534	333	
225	331		535	334	
226	332		536	335	
227	333		537	336	
228	334		538	337	
229	335		539	338	
230	336		540	339	
231	337		541	340	
232	338		542	341	
233	339		543	342	
234	340		544	343	
235	341		545	344	
236	342		546	345	
237	343		547	346	
238	344		548	347	
239	345		549	348	
240	346		550	349	
241	347		551	350	
242	348		552	351	
243	349		553	352	
244	350		554	353	
245	351		555	354	
246	352		556	355	
247	353		557	356	
248	354		558	357	
249	355		559	358	
250	356		560	359	

1931 1932 1933 1934 1935 1936 1937 1938 1939 1940 1941 1942

1943 1944 1945 1946 1947 1948 1949 1950 1951 1952 1953 1954

2320	2321	2322	2323	2324	2325	2326	2327	2328	2329	2330	2331
2332	2333	2334	2335	2336	2337	2338	2339	2340	2341	2342	2343
2344	2345	2346	2347	2348	2349	2350	2351	2352	2353	2354	2355
2356	2357	2358	2359	2360	2361	2362	2363	2364	2365	2366	2367
2368	2369	2370	2371	2372	2373	2374	2375	2376	2377	2378	2379
2380	2381	2382	2383	2384	2385	2386	2387	2388	2389	2390	2391
2392	2393	2394	2395	2396	2397	2398	2399	2400	2401	2402	2403
2404	2405	2406	2407	2408	2409	2410	2411	2412	2413	2414	2415
2416	2417	2418	2419	2420	2421	2422	2423	2424	2425	2426	2427
2428	2429	2430	2431	2432	2433	2434	2435	2436	2437	2438	2439
2440	2441	2442	2443	2444	2445	2446	2447	2448	2449	2450	2451
2452	2453	2454	2455	2456	2457	2458	2459	2460	2461	2462	2463
2464	2465	2466	2467	2468	2469	2470	2471	2472	2473	2474	2475
2476	2477	2478	2479	2480	2481	2482	2483	2484	2485	2486	2487
2488	2489	2490	2491	2492	2493	2494	2495	2496	2497	2498	2499
2500	2501	2502	2503	2504	2505	2506	2507	2508	2509	2510	2511
2512	2513	2514	2515	2516	2517	2518	2519	2520	2521	2522	2523
2524	2525	2526	2527	2528	2529	2530	2531	2532	2533	2534	2535
2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542	2543	2544	2545	2546	2547
2548	2549	2550	2551	2552	2553	2554	2555	2556	2557	2558	2559
2560	2561	2562	2563	2564	2565	2566	2567	2568	2569	2570	2571
2572	2573	2574	2575	2576	2577	2578	2579	2580	2581	2582	2583
2584	2585	2586	2587	2588	2589	2590	2591	2592	2593	2594	2595
2596	2597	2598	2599	2600	2601	2602	2603	2604	2605	2606	2607
2608	2609	2610	2611	2612	2613	2614	2615	2616	2617	2618	2619
2620	2621	2622	2623	2624	2625	2626	2627	2628	2629	2630	2631
2632	2633	2634	2635	2636	2637	2638	2639	2640	2641	2642	2643
2644	2645	2646	2647	2648	2649	2650	2651	2652	2653	2654	2655
2656	2657	2658	2659	2660	2661	2662	2663	2664	2665	2666	2667
2668	2669	2670	2671	2672	2673	2674	2675	2676	2677	2678	2679
2680	2681	2682	2683	2684	2685	2686	2687	2688	2689	2690	2691
2692	2693	2694	2695	2696	2697	2698	2699	2700	2701	2702	2703
2704	2705	2706	2707	2708	2709	2710	2711	2712	2713	2714	2715
2716	2717	2718	2719	2720	2721	2722	2723	2724	2725	2726	2727
2728	2729	2730	2731	2732	2733	2734	2735	2736	2737	2738	2739
2740	2741	2742	2743	2744	2745	2746	2747	2748	2749	2750	2751
2752	2753	2754	2755	2756	2757	2758	2759	2760	2761	2762	2763
2764	2765	2766	2767	2768	2769	2770	2771	2772	2773	2774	2775
2776	2777	2778	2779	2780	2781	2782	2783	2784	2785	2786	2787
2788	2789	2790	2791	2792	2793	2794	2795	2796	2797	2798	2799
2800	2801	2802	2803	2804	2805	2806	2807	2808	2809	2810	2811
2812	2813	2814	2815	2816	2817	2818	2819	2820	2821	2822	2823
2824	2825	2826	2827	2828	2829	2830	2831	2832	2833	2834	2835
2836	2837	2838	2839	2840	2841	2842	2843	2844	2845	2846	2847
2848	2849	2850	2851	2852	2853	2854	2855	2856	2857	2858	2859
2860	2861	2862	2863	2864	2865	2866	2867	2868	2869	2870	2871
2872	2873	2874	2875	2876	2877	2878	2879	2880	2881	2882	2883
2884	2885	2886	2887	2888	2889	2890	2891	2892	2893	2894	2895
2896	2897	2898	2899	2900	2901	2902	2903	2904	2905	2906	2907
2908	2909	2910	2911	2912	2913	2914	2915	2916	2917	2918	2919
2920	2921	2922	2923	2924	2925	2926	2927	2928	2929	2930	2931
2932	2933	2934	2935	2936	2937	2938	2939	2940	2941	2942	2943
2944	2945	2946	2947	2948	2949	2950	2951	2952	2953	2954	2955
2956	2957	2958	2959	2960	2961	2962	2963	2964	2965	2966	2967
2968	2969	2970	2971	2972	2973	2974	2975	2976	2977	2978	2979
2980	2981	2982	2983	2984	2985	2986	2987	2988	2989	2990	2991
2992	2993	2994	2995	2996	2997	2998	2999	3000	3001	3002	3003

3004 3005 3006 3007 3008 3009 3010 3011 3012 3013 3014 3015

3016 3017 3018 3019 3020 3021 3022 3023 3024 3025 3026 3027

3028 3029 3030 3031 3032 3033 3034 3035 3036 3037 3038 3039

3040 3041 3042 3043 3044 3045 3046 3047 3048 3049 3050 3051

3052 3053 3054 3055 3056 3057 3058 3059 3060 3061 3062 3063

3064 3065 3066 3067 3068 3069 3070 3071 3072 3073 3074 3075

3076 3077 3078 3079 3080 3081 3082 3083 3084 3085 3086 3087

3088 3089 3090 3091 3092 3093 3094 3095 3096 3097 3098 3099

3100 3101 3102 3103 3104 3105 3106 3107 3108 3109 3110 3111

3112 3113 3114 3115 3116 3117 3118 3119 3120 3121 3122 3123

3124 3125 3126 3127 3128 3129 3130 3131 3132 3133 3134 3135

1	2114	2115	2116	2117	2118	2119	2120	2121	2122	2123	2124	2125	2126	2127	2128	2129	2130	2131	2132	2133	2134	2135	2136	2137	2138	2139	2140	2141	2142	2143	2144	2145	2146	2147	2148	2149	2150	2151	2152	2153	2154	2155	2156	2157	2158	2159	2160	2161	2162	2163	2164	2165	2166	2167	2168	2169	2170	2171	2172	2173	2174	2175	2176	2177	2178	2179	2180	2181	2182	2183	2184	2185	2186	2187	2188	2189	2190	2191	2192	2193	2194	2195	2196	2197	2198	2199	2200													
2	2201	2202	2203	2204	2205	2206	2207	2208	2209	2210	2211	2212	2213	2214	2215	2216	2217	2218	2219	2220	2221	2222	2223	2224	2225	2226	2227	2228	2229	2230	2231	2232	2233	2234	2235	2236	2237	2238	2239	2240	2241	2242	2243	2244	2245	2246	2247	2248	2249	2250	2251	2252	2253	2254	2255	2256	2257	2258	2259	2260	2261	2262	2263	2264	2265	2266	2267	2268	2269	2270	2271	2272	2273	2274	2275	2276	2277	2278	2279	2280	2281	2282	2283	2284	2285	2286	2287	2288	2289	2290	2291	2292	2293	2294	2295	2296	2297	2298	2299	2300
3	2301	2302	2303	2304	2305	2306	2307	2308	2309	2310	2311	2312	2313	2314	2315	2316	2317	2318	2319	2320	2321	2322	2323	2324	2325	2326	2327	2328	2329	2330	2331	2332	2333	2334	2335	2336	2337	2338	2339	2340	2341	2342	2343	2344	2345	2346	2347	2348	2349	2350	2351	2352	2353	2354	2355	2356	2357	2358	2359	2360	2361	2362	2363	2364	2365	2366	2367	2368	2369	2370	2371	2372	2373	2374	2375	2376	2377	2378	2379	2380	2381	2382	2383	2384	2385	2386	2387	2388	2389	2390	2391	2392	2393	2394	2395	2396	2397	2398	2399	2400
4	2401	2402	2403	2404	2405	2406	2407	2408	2409	2410	2411	2412	2413	2414	2415	2416	2417	2418	2419	2420	2421	2422	2423	2424	2425	2426	2427	2428	2429	2430	2431	2432	2433	2434	2435	2436	2437	2438	2439	2440	2441	2442	2443	2444	2445	2446	2447	2448	2449	2450	2451	2452	2453	2454	2455	2456	2457	2458	2459	2460	2461	2462	2463	2464	2465	2466	2467	2468	2469	2470	2471	2472	2473	2474	2475	2476	2477	2478	2479	2480	2481	2482	2483	2484	2485	2486	2487	2488	2489	2490	2491	2492	2493	2494	2495	2496	2497	2498	2499	2500
5	2501	2502	2503	2504	2505	2506	2507	2508	2509	2510	2511	2512	2513	2514	2515	2516	2517	2518	2519	2520	2521	2522	2523	2524	2525	2526	2527	2528	2529	2530	2531	2532	2533	2534	2535	2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542	2543	2544	2545	2546	2547	2548	2549	2550	2551	2552	2553	2554	2555	2556	2557	2558	2559	2560	2561	2562	2563	2564	2565	2566	2567	2568	2569	2570	2571	2572	2573	2574	2575	2576	2577	2578	2579	2580	2581	2582	2583	2584	2585	2586	2587	2588	2589	2590	2591	2592	2593	2594	2595	2596	2597	2598	2599	2600

6	2601	2602	2603	2604	2605	2606	2607	2608	2609	2610	2611	2612	2613	2614	2615	2616	2617	2618	2619	2620	2621	2622	2623	2624	2625	2626	2627	2628	2629	2630	2631	2632	2633	2634	2635	2636	2637	2638	2639	2640	2641	2642	2643	2644	2645	2646	2647	2648	2649	2650	2651	2652	2653	2654	2655	2656	2657	2658	2659	2660	2661	2662	2663	2664	2665	2666	2667	2668	2669	2670	2671	2672	2673	2674	2675	2676	2677	2678	2679	2680	2681	2682	2683	2684	2685	2686	2687	2688	2689	2690	2691	2692	2693	2694	2695	2696	2697	2698	2699	2700
7	2701	2702	2703	2704	2705	2706	2707	2708	2709	2710	2711	2712	2713	2714	2715	2716	2717	2718	2719	2720	2721	2722	2723	2724	2725	2726	2727	2728	2729	2730	2731	2732	2733	2734	2735	2736	2737	2738	2739	2740	2741	2742	2743	2744	2745	2746	2747	2748	2749	2750	2751	2752	2753	2754	2755	2756	2757	2758	2759	2760	2761	2762	2763	2764	2765	2766	2767	2768	2769	2770	2771	2772	2773	2774	2775	2776	2777	2778	2779	2780	2781	2782	2783	2784	2785	2786	2787	2788	2789	2790	2791	2792	2793	2794	2795	2796	2797	2798	2799	2800
8	2801	2802	2803	2804	2805	2806	2807	2808	2809	2810	2811	2812	2813	2814	2815	2816	2817	2818	2819	2820	2821	2822	2823	2824	2825	2826	2827	2828	2829	2830	2831	2832	2833	2834	2835	2836	2837	2838	2839	2840	2841	2842	2843	2844	2845	2846	2847	2848	2849	2850	2851	2852	2853	2854	2855	2856	2857	2858	2859	2860	2861	2862	2863	2864	2865	2866	2867	2868	2869	2870	2871	2872	2873	2874	2875	2876	2877	2878	2879	2880	2881	2882	2883	2884	2885	2886	2887	2888	2889	2890	2891	2892	2893	2894	2895	2896	2897	2898	2899	2900
9	2901	2902	2903	2904	2905	2906	2907	2908	2909	2910	2911	2912	2913	2914	2915	2916	2917	2918	2919	2920	2921	2922	2923	2924	2925	2926	2927	2928	2929	2930	2931	2932	2933	2934	2935	2936	2937	2938	2939	2940	2941	2942	2943	2944	2945	2946	2947	2948	2949	2950	2951	2952	2953	2954	2955	2956	2957	2958	2959	2960	2961	2962	2963	2964	2965	2966	2967	2968	2969	2970	2971	2972	2973	2974	2975	2976	2977	2978	2979	2980	2981	2982	2983	2984	2985	2986	2987	2988	2989	2990	2991	2992	2993	2994	2995	2996	2997	2998	2999	3000

Table with multiple columns of numerical data, possibly representing a ledger or financial record. The data is organized in rows and columns, with some values appearing to be sums or averages of others.

Table with multiple columns of numerical data, similar to the first table. It contains a large volume of numbers, likely representing a detailed accounting or statistical record. The layout is consistent with the first table, showing a grid of values.

LINE NO. 1001
 DATE 10/10/70
 TIME 10:00
 FROM 1001
 TO 1001
 BY 1001
 REASON 1001
 COMMENTS 1001

LINE NO.	DATE	TIME	FROM	TO	BY	REASON	COMMENTS
1001	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1002	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1003	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1004	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1005	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1006	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1007	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1008	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1009	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1010	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001

LINE NO.	DATE	TIME	FROM	TO	BY	REASON	COMMENTS
1011	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1012	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1013	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1014	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1015	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1016	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1017	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1018	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1019	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1020	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001

EJEMPLO N° 2
 (2 PAGES DE BOMBA)
 (POR CATEGORIA)

LINE NO. 1021
 DATE 10/10/70
 TIME 10:00
 FROM 1001
 TO 1001
 BY 1001
 REASON 1001
 COMMENTS 1001

LINE NO.	DATE	TIME	FROM	TO	BY	REASON	COMMENTS
1021	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1022	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1023	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1024	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1025	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1026	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1027	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1028	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1029	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1030	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001

LINE NO.	DATE	TIME	FROM	TO	BY	REASON	COMMENTS
1031	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1032	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1033	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1034	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1035	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1036	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1037	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1038	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1039	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1040	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001

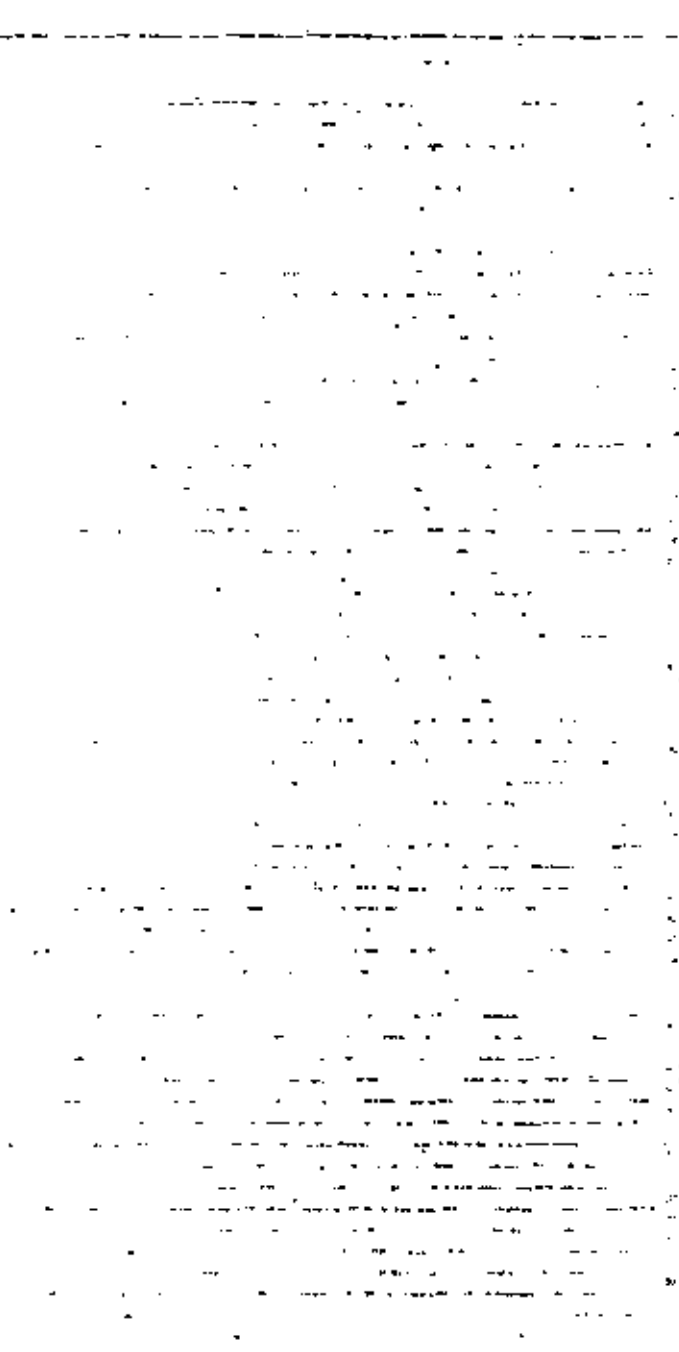
LINE NO.	DATE	TIME	FROM	TO	BY	REASON	COMMENTS
1041	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1042	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1043	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1044	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1045	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1046	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1047	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1048	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1049	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001
1050	10/10/70	10:00	1001	1001	1001	1001	1001

112723	112724	112725	112726	112727	112728	112729	112730	112731	112732	112733	112734	112735	112736	112737	112738	112739	112740	112741	112742	112743	112744	112745	112746	112747	112748	112749	112750	112751	112752	112753	112754	112755	112756	112757	112758	112759	112760	112761	112762	112763	112764	112765	112766	112767	112768	112769	112770	112771	112772	112773	112774	112775	112776	112777	112778	112779	112780	112781	112782	112783	112784	112785	112786	112787	112788	112789	112790	112791	112792	112793	112794	112795	112796	112797	112798	112799	112800
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

112801	112802	112803	112804	112805	112806	112807	112808	112809	112810	112811	112812	112813	112814	112815	112816	112817	112818	112819	112820	112821	112822	112823	112824	112825	112826	112827	112828	112829	112830	112831	112832	112833	112834	112835	112836	112837	112838	112839	112840	112841	112842	112843	112844	112845	112846	112847	112848	112849	112850	112851	112852	112853	112854	112855	112856	112857	112858	112859	112860	112861	112862	112863	112864	112865	112866	112867	112868	112869	112870	112871	112872	112873	112874	112875	112876	112877	112878	112879	112880	112881	112882	112883	112884	112885	112886	112887	112888	112889	112890	112891	112892	112893	112894	112895	112896	112897	112898	112899	112900
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

112901	112902	112903	112904	112905	112906	112907	112908	112909	112910	112911	112912	112913	112914	112915	112916	112917	112918	112919	112920	112921	112922	112923	112924	112925	112926	112927	112928	112929	112930	112931	112932	112933	112934	112935	112936	112937	112938	112939	112940	112941	112942	112943	112944	112945	112946	112947	112948	112949	112950	112951	112952	112953	112954	112955	112956	112957	112958	112959	112960	112961	112962	112963	112964	112965	112966	112967	112968	112969	112970	112971	112972	112973	112974	112975	112976	112977	112978	112979	112980	112981	112982	112983	112984	112985	112986	112987	112988	112989	112990	112991	112992	112993	112994	112995	112996	112997	112998	112999	113000
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

113001	113002	113003	113004	113005	113006	113007	113008	113009	113010	113011	113012	113013	113014	113015	113016	113017	113018	113019	113020	113021	113022	113023	113024	113025	113026	113027	113028	113029	113030	113031	113032	113033	113034	113035	113036	113037	113038	113039	113040	113041	113042	113043	113044	113045	113046	113047	113048	113049	113050	113051	113052	113053	113054	113055	113056	113057	113058	113059	113060	113061	113062	113063	113064	113065	113066	113067	113068	113069	113070	113071	113072	113073	113074	113075	113076	113077	113078	113079	113080	113081	113082	113083	113084	113085	113086	113087	113088	113089	113090	113091	113092	113093	113094	113095	113096	113097	113098	113099	113100
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------



10704 10.95

1	0000	0001	0002	0003	0004	0005	0006	0007	0008	0009	0010
	0011	0012	0013	0014	0015	0016	0017	0018	0019	0020	0021
2	0022	0023	0024	0025	0026	0027	0028	0029	0030	0031	0032
	0033	0034	0035	0036	0037	0038	0039	0040	0041	0042	0043
3	0044	0045	0046	0047	0048	0049	0050	0051	0052	0053	0054
	0055	0056	0057	0058	0059	0060	0061	0062	0063	0064	0065
4	0066	0067	0068	0069	0070	0071	0072	0073	0074	0075	0076
	0077	0078	0079	0080	0081	0082	0083	0084	0085	0086	0087
5	0088	0089	0090	0091	0092	0093	0094	0095	0096	0097	0098
	0099	0100	0101	0102	0103	0104	0105	0106	0107	0108	0109
6	0110	0111	0112	0113	0114	0115	0116	0117	0118	0119	0120
	0121	0122	0123	0124	0125	0126	0127	0128	0129	0130	0131
7	0132	0133	0134	0135	0136	0137	0138	0139	0140	0141	0142
	0143	0144	0145	0146	0147	0148	0149	0150	0151	0152	0153
8	0154	0155	0156	0157	0158	0159	0160	0161	0162	0163	0164
	0165	0166	0167	0168	0169	0170	0171	0172	0173	0174	0175
9	0176	0177	0178	0179	0180	0181	0182	0183	0184	0185	0186
	0187	0188	0189	0190	0191	0192	0193	0194	0195	0196	0197
10	0198	0199	0200	0201	0202	0203	0204	0205	0206	0207	0208
	0209	0210	0211	0212	0213	0214	0215	0216	0217	0218	0219

10712 12.13

1	0220	0221	0222	0223	0224	0225	0226	0227	0228	0229	0230
	0231	0232	0233	0234	0235	0236	0237	0238	0239	0240	0241
2	0242	0243	0244	0245	0246	0247	0248	0249	0250	0251	0252
	0253	0254	0255	0256	0257	0258	0259	0260	0261	0262	0263
3	0264	0265	0266	0267	0268	0269	0270	0271	0272	0273	0274
	0275	0276	0277	0278	0279	0280	0281	0282	0283	0284	0285
4	0286	0287	0288	0289	0290	0291	0292	0293	0294	0295	0296
	0297	0298	0299	0300	0301	0302	0303	0304	0305	0306	0307
5	0308	0309	0310	0311	0312	0313	0314	0315	0316	0317	0318
	0319	0320	0321	0322	0323	0324	0325	0326	0327	0328	0329
6	0330	0331	0332	0333	0334	0335	0336	0337	0338	0339	0340
	0341	0342	0343	0344	0345	0346	0347	0348	0349	0350	0351
7	0352	0353	0354	0355	0356	0357	0358	0359	0360	0361	0362
	0363	0364	0365	0366	0367	0368	0369	0370	0371	0372	0373
8	0374	0375	0376	0377	0378	0379	0380	0381	0382	0383	0384
	0385	0386	0387	0388	0389	0390	0391	0392	0393	0394	0395
9	0396	0397	0398	0399	0400	0401	0402	0403	0404	0405	0406
	0407	0408	0409	0410	0411	0412	0413	0414	0415	0416	0417
10	0418	0419	0420	0421	0422	0423	0424	0425	0426	0427	0428
	0429	0430	0431	0432	0433	0434	0435	0436	0437	0438	0439

1	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
2	00001	00001	00001	00001	00001	00001	00001	00001	00001	00001
3	00002	00002	00002	00002	00002	00002	00002	00002	00002	00002
4	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003
5	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004
6	00005	00005	00005	00005	00005	00005	00005	00005	00005	00005
7	00006	00006	00006	00006	00006	00006	00006	00006	00006	00006
8	00007	00007	00007	00007	00007	00007	00007	00007	00007	00007
9	00008	00008	00008	00008	00008	00008	00008	00008	00008	00008
0	00009	00009	00009	00009	00009	00009	00009	00009	00009	00009

TABLE 22-25

1	00010	00010	00010	00010	00010	00010	00010	00010	00010	00010
2	00011	00011	00011	00011	00011	00011	00011	00011	00011	00011
3	00012	00012	00012	00012	00012	00012	00012	00012	00012	00012
4	00013	00013	00013	00013	00013	00013	00013	00013	00013	00013
5	00014	00014	00014	00014	00014	00014	00014	00014	00014	00014
6	00015	00015	00015	00015	00015	00015	00015	00015	00015	00015
7	00016	00016	00016	00016	00016	00016	00016	00016	00016	00016
8	00017	00017	00017	00017	00017	00017	00017	00017	00017	00017
9	00018	00018	00018	00018	00018	00018	00018	00018	00018	00018
0	00019	00019	00019	00019	00019	00019	00019	00019	00019	00019

TABLE 23-25

1	00020	00020	00020	00020	00020	00020	00020	00020	00020	00020
2	00021	00021	00021	00021	00021	00021	00021	00021	00021	00021
3	00022	00022	00022	00022	00022	00022	00022	00022	00022	00022
4	00023	00023	00023	00023	00023	00023	00023	00023	00023	00023
5	00024	00024	00024	00024	00024	00024	00024	00024	00024	00024
6	00025	00025	00025	00025	00025	00025	00025	00025	00025	00025
7	00026	00026	00026	00026	00026	00026	00026	00026	00026	00026
8	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027
9	00028	00028	00028	00028	00028	00028	00028	00028	00028	00028
0	00029	00029	00029	00029	00029	00029	00029	00029	00029	00029

11/24/54

1	-0211	-0212	-0213	-0214	-0215	-0216	-0217	-0218	-0219	-0220	-0221	-0222
	-0223	-0224	-0225	-0226	-0227	-0228	-0229	-0230	-0231	-0232	-0233	-0234
	-0235	-0236	-0237	-0238	-0239	-0240	-0241	-0242	-0243	-0244	-0245	-0246
2	-0247	-0248	-0249	-0250	-0251	-0252	-0253	-0254	-0255	-0256	-0257	-0258
	-0259	-0260	-0261	-0262	-0263	-0264	-0265	-0266	-0267	-0268	-0269	-0270
	-0271	-0272	-0273	-0274	-0275	-0276	-0277	-0278	-0279	-0280	-0281	-0282
3	-0283	-0284	-0285	-0286	-0287	-0288	-0289	-0290	-0291	-0292	-0293	-0294
	-0295	-0296	-0297	-0298	-0299	-0300	-0301	-0302	-0303	-0304	-0305	-0306
	-0307	-0308	-0309	-0310	-0311	-0312	-0313	-0314	-0315	-0316	-0317	-0318
4	-0319	-0320	-0321	-0322	-0323	-0324	-0325	-0326	-0327	-0328	-0329	-0330
	-0331	-0332	-0333	-0334	-0335	-0336	-0337	-0338	-0339	-0340	-0341	-0342
	-0343	-0344	-0345	-0346	-0347	-0348	-0349	-0350	-0351	-0352	-0353	-0354
5	-0355	-0356	-0357	-0358	-0359	-0360	-0361	-0362	-0363	-0364	-0365	-0366
	-0367	-0368	-0369	-0370	-0371	-0372	-0373	-0374	-0375	-0376	-0377	-0378
	-0379	-0380	-0381	-0382	-0383	-0384	-0385	-0386	-0387	-0388	-0389	-0390
6	-0391	-0392	-0393	-0394	-0395	-0396	-0397	-0398	-0399	-0400	-0401	-0402
	-0403	-0404	-0405	-0406	-0407	-0408	-0409	-0410	-0411	-0412	-0413	-0414
	-0415	-0416	-0417	-0418	-0419	-0420	-0421	-0422	-0423	-0424	-0425	-0426
7	-0427	-0428	-0429	-0430	-0431	-0432	-0433	-0434	-0435	-0436	-0437	-0438
	-0439	-0440	-0441	-0442	-0443	-0444	-0445	-0446	-0447	-0448	-0449	-0450
	-0451	-0452	-0453	-0454	-0455	-0456	-0457	-0458	-0459	-0460	-0461	-0462
8	-0463	-0464	-0465	-0466	-0467	-0468	-0469	-0470	-0471	-0472	-0473	-0474
	-0475	-0476	-0477	-0478	-0479	-0480	-0481	-0482	-0483	-0484	-0485	-0486
	-0487	-0488	-0489	-0490	-0491	-0492	-0493	-0494	-0495	-0496	-0497	-0498
9	-0499	-0500	-0501	-0502	-0503	-0504	-0505	-0506	-0507	-0508	-0509	-0510
	-0511	-0512	-0513	-0514	-0515	-0516	-0517	-0518	-0519	-0520	-0521	-0522
	-0523	-0524	-0525	-0526	-0527	-0528	-0529	-0530	-0531	-0532	-0533	-0534

11/24/54

1	-0535	-0536	-0537	-0538	-0539	-0540	-0541	-0542	-0543	-0544	-0545	-0546
	-0547	-0548	-0549	-0550	-0551	-0552	-0553	-0554	-0555	-0556	-0557	-0558
	-0559	-0560	-0561	-0562	-0563	-0564	-0565	-0566	-0567	-0568	-0569	-0570
2	-0571	-0572	-0573	-0574	-0575	-0576	-0577	-0578	-0579	-0580	-0581	-0582
	-0583	-0584	-0585	-0586	-0587	-0588	-0589	-0590	-0591	-0592	-0593	-0594
	-0595	-0596	-0597	-0598	-0599	-0600	-0601	-0602	-0603	-0604	-0605	-0606
3	-0607	-0608	-0609	-0610	-0611	-0612	-0613	-0614	-0615	-0616	-0617	-0618
	-0619	-0620	-0621	-0622	-0623	-0624	-0625	-0626	-0627	-0628	-0629	-0630
	-0631	-0632	-0633	-0634	-0635	-0636	-0637	-0638	-0639	-0640	-0641	-0642
4	-0643	-0644	-0645	-0646	-0647	-0648	-0649	-0650	-0651	-0652	-0653	-0654
	-0655	-0656	-0657	-0658	-0659	-0660	-0661	-0662	-0663	-0664	-0665	-0666
	-0667	-0668	-0669	-0670	-0671	-0672	-0673	-0674	-0675	-0676	-0677	-0678
5	-0679	-0680	-0681	-0682	-0683	-0684	-0685	-0686	-0687	-0688	-0689	-0690
	-0691	-0692	-0693	-0694	-0695	-0696	-0697	-0698	-0699	-0700	-0701	-0702
	-0703	-0704	-0705	-0706	-0707	-0708	-0709	-0710	-0711	-0712	-0713	-0714
6	-0715	-0716	-0717	-0718	-0719	-0720	-0721	-0722	-0723	-0724	-0725	-0726
	-0727	-0728	-0729	-0730	-0731	-0732	-0733	-0734	-0735	-0736	-0737	-0738
	-0739	-0740	-0741	-0742	-0743	-0744	-0745	-0746	-0747	-0748	-0749	-0750
7	-0751	-0752	-0753	-0754	-0755	-0756	-0757	-0758	-0759	-0760	-0761	-0762
	-0763	-0764	-0765	-0766	-0767	-0768	-0769	-0770	-0771	-0772	-0773	-0774
	-0775	-0776	-0777	-0778	-0779	-0780	-0781	-0782	-0783	-0784	-0785	-0786
8	-0787	-0788	-0789	-0790	-0791	-0792	-0793	-0794	-0795	-0796	-0797	-0798
	-0799	-0800	-0801	-0802	-0803	-0804	-0805	-0806	-0807	-0808	-0809	-0810
	-0811	-0812	-0813	-0814	-0815	-0816	-0817	-0818	-0819	-0820	-0821	-0822
9	-0823	-0824	-0825	-0826	-0827	-0828	-0829	-0830	-0831	-0832	-0833	-0834
	-0835	-0836	-0837	-0838	-0839	-0840	-0841	-0842	-0843	-0844	-0845	-0846
	-0847	-0848	-0849	-0850	-0851	-0852	-0853	-0854	-0855	-0856	-0857	-0858

LINE	FUNCTIONS	TYPE	BOOK	1	10/10/10	NO	INDEX	P	10/10/10
425	10	EXT							4171 30
426	40	EXT							0 53
427	40								4255 70
428	70	INACTIVE							0 119
429	100							INACTIVE	4273 140
430	170	INACTIVE							0 170
431	170								0 200
432	200							INACTIVE	4430 200
433	200	INACTIVE							0 260
434	200								4441 200
435	200								0 320
436	200	EXT							0 320

LINE	INDEX	INDEX	INDEX	INDEX	INDEX	INDEX	INDEX
437	20	J	42 42	100			
438	20	J	42 42	100			
439	70	J	75 70	100			
440	70	J	81 91	100			
441	70	J	82 91	100			
442	170	J	102 140	100			
443	170	J	104 120	100			
444	100	J	144 170	100			
445	200	J	147 170	100			
446	200	J	147 170	100			

Examples No 4

STATISTICS
 PROGRAM LENGTH 54208 26402
 QUOTED LENGTH 41303 2130
 100000 CM USED

11/10/00 100

1	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000
2	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000
3	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000
4	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000
5	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000
6	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000
7	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000

8	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000
9	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000
10	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000	30,0000

	30,0000	30,0001	30,0002	30,0003	30,0004	30,0005	30,0006	30,0007	30,0008	30,0009
1	30,0000	30,0001	30,0002	30,0003	30,0004	30,0005	30,0006	30,0007	30,0008	30,0009
2	30,0010	30,0011	30,0012	30,0013	30,0014	30,0015	30,0016	30,0017	30,0018	30,0019
3	30,0020	30,0021	30,0022	30,0023	30,0024	30,0025	30,0026	30,0027	30,0028	30,0029
4	30,0030	30,0031	30,0032	30,0033	30,0034	30,0035	30,0036	30,0037	30,0038	30,0039
5	30,0040	30,0041	30,0042	30,0043	30,0044	30,0045	30,0046	30,0047	30,0048	30,0049
6	30,0050	30,0051	30,0052	30,0053	30,0054	30,0055	30,0056	30,0057	30,0058	30,0059
7	30,0060	30,0061	30,0062	30,0063	30,0064	30,0065	30,0066	30,0067	30,0068	30,0069
8	30,0070	30,0071	30,0072	30,0073	30,0074	30,0075	30,0076	30,0077	30,0078	30,0079
9	30,0080	30,0081	30,0082	30,0083	30,0084	30,0085	30,0086	30,0087	30,0088	30,0089
10	30,0090	30,0091	30,0092	30,0093	30,0094	30,0095	30,0096	30,0097	30,0098	30,0099

110470 0.04

	30,0100	30,0101	30,0102	30,0103	30,0104	30,0105	30,0106	30,0107	30,0108	30,0109
1	30,0100	30,0101	30,0102	30,0103	30,0104	30,0105	30,0106	30,0107	30,0108	30,0109
2	30,0110	30,0111	30,0112	30,0113	30,0114	30,0115	30,0116	30,0117	30,0118	30,0119
3	30,0120	30,0121	30,0122	30,0123	30,0124	30,0125	30,0126	30,0127	30,0128	30,0129
4	30,0130	30,0131	30,0132	30,0133	30,0134	30,0135	30,0136	30,0137	30,0138	30,0139
5	30,0140	30,0141	30,0142	30,0143	30,0144	30,0145	30,0146	30,0147	30,0148	30,0149
6	30,0150	30,0151	30,0152	30,0153	30,0154	30,0155	30,0156	30,0157	30,0158	30,0159
7	30,0160	30,0161	30,0162	30,0163	30,0164	30,0165	30,0166	30,0167	30,0168	30,0169
8	30,0170	30,0171	30,0172	30,0173	30,0174	30,0175	30,0176	30,0177	30,0178	30,0179
9	30,0180	30,0181	30,0182	30,0183	30,0184	30,0185	30,0186	30,0187	30,0188	30,0189
10	30,0190	30,0191	30,0192	30,0193	30,0194	30,0195	30,0196	30,0197	30,0198	30,0199

110470 0.02

	30,0200	30,0201	30,0202	30,0203	30,0204	30,0205	30,0206	30,0207	30,0208	30,0209
1	30,0200	30,0201	30,0202	30,0203	30,0204	30,0205	30,0206	30,0207	30,0208	30,0209

ADDRESS	TYPE	DESCRIPTION	ADDRESS	TYPE	DESCRIPTION
4700	ITER	INTEGER	4700	ITER	INTEGER
4701	ITER	INTEGER	4701	ITER	INTEGER
4702	ITER	INTEGER	4702	ITER	INTEGER
4703	ITER	INTEGER	4703	ITER	INTEGER
4704	ITER	INTEGER	4704	ITER	INTEGER
4705	ITER	INTEGER	4705	ITER	INTEGER
4706	ITER	INTEGER	4706	ITER	INTEGER
4707	ITER	INTEGER	4707	ITER	INTEGER
4708	ITER	INTEGER	4708	ITER	INTEGER
4709	ITER	INTEGER	4709	ITER	INTEGER
4710	ITER	INTEGER	4710	ITER	INTEGER
4711	ITER	INTEGER	4711	ITER	INTEGER
4712	ITER	INTEGER	4712	ITER	INTEGER
4713	ITER	INTEGER	4713	ITER	INTEGER
4714	ITER	INTEGER	4714	ITER	INTEGER
4715	ITER	INTEGER	4715	ITER	INTEGER
4716	ITER	INTEGER	4716	ITER	INTEGER
4717	ITER	INTEGER	4717	ITER	INTEGER
4718	ITER	INTEGER	4718	ITER	INTEGER
4719	ITER	INTEGER	4719	ITER	INTEGER
4720	ITER	INTEGER	4720	ITER	INTEGER

FILE NAMES: INPUT 2054 OUTPUT 0 TAPES FMT 2054 TAPES FMT

CARDINALS: TYPE ARG0 FMTSET 4

POLINE FUNCTIONS: TYPE ARG0 MOD INTEGER 2 TITRIN

STATEMENT LABELS	ADDRESS	TYPE	ADDRESS	TYPE	ADDRESS	TYPE
4217	50	FMT	4173	30		
4218	50	FMT	4217	50		INACTIVE
4219	50	FMT	4218	50		
4220	50	FMT	4219	50		INACTIVE
4221	50	FMT	4220	50		
4222	50	FMT	4221	50		INACTIVE
4223	50	FMT	4222	50		
4224	50	FMT	4223	50		INACTIVE
4225	50	FMT	4224	50		
4226	50	FMT	4225	50		INACTIVE
4227	50	FMT	4226	50		
4228	50	FMT	4227	50		INACTIVE
4229	50	FMT	4228	50		
4230	50	FMT	4229	50		INACTIVE
4231	50	FMT	4230	50		
4232	50	FMT	4231	50		INACTIVE
4233	50	FMT	4232	50		
4234	50	FMT	4233	50		INACTIVE
4235	50	FMT	4234	50		
4236	50	FMT	4235	50		INACTIVE
4237	50	FMT	4236	50		
4238	50	FMT	4237	50		INACTIVE
4239	50	FMT	4238	50		
4240	50	FMT	4239	50		INACTIVE
4241	50	FMT	4240	50		
4242	50	FMT	4241	50		INACTIVE
4243	50	FMT	4242	50		
4244	50	FMT	4243	50		INACTIVE
4245	50	FMT	4244	50		
4246	50	FMT	4245	50		INACTIVE
4247	50	FMT	4246	50		
4248	50	FMT	4247	50		INACTIVE
4249	50	FMT	4248	50		
4250	50	FMT	4249	50		INACTIVE
4251	50	FMT	4250	50		
4252	50	FMT	4251	50		INACTIVE
4253	50	FMT	4252	50		
4254	50	FMT	4253	50		INACTIVE
4255	50	FMT	4254	50		
4256	50	FMT	4255	50		INACTIVE
4257	50	FMT	4256	50		
4258	50	FMT	4257	50		INACTIVE
4259	50	FMT	4258	50		
4260	50	FMT	4259	50		INACTIVE
4261	50	FMT	4260	50		
4262	50	FMT	4261	50		INACTIVE
4263	50	FMT	4262	50		
4264	50	FMT	4263	50		INACTIVE
4265	50	FMT	4264	50		
4266	50	FMT	4265	50		INACTIVE
4267	50	FMT	4266	50		
4268	50	FMT	4267	50		INACTIVE
4269	50	FMT	4268	50		
4270	50	FMT	4269	50		INACTIVE
4271	50	FMT	4270	50		
4272	50	FMT	4271	50		INACTIVE
4273	50	FMT	4272	50		
4274	50	FMT	4273	50		INACTIVE
4275	50	FMT	4274	50		
4276	50	FMT	4275	50		INACTIVE
4277	50	FMT	4276	50		
4278	50	FMT	4277	50		INACTIVE
4279	50	FMT	4278	50		
4280	50	FMT	4279	50		INACTIVE
4281	50	FMT	4280	50		
4282	50	FMT	4281	50		INACTIVE
4283	50	FMT	4282	50		
4284	50	FMT	4283	50		INACTIVE
4285	50	FMT	4284	50		
4286	50	FMT	4285	50		INACTIVE
4287	50	FMT	4286	50		
4288	50	FMT	4287	50		INACTIVE
4289	50	FMT	4288	50		
4290	50	FMT	4289	50		INACTIVE
4291	50	FMT	4290	50		
4292	50	FMT	4291	50		INACTIVE
4293	50	FMT	4292	50		
4294	50	FMT	4293	50		INACTIVE
4295	50	FMT	4294	50		
4296	50	FMT	4295	50		INACTIVE
4297	50	FMT	4296	50		
4298	50	FMT	4297	50		INACTIVE
4299	50	FMT	4298	50		
4300	50	FMT	4299	50		INACTIVE
4301	50	FMT	4300	50		
4302	50	FMT	4301	50		INACTIVE
4303	50	FMT	4302	50		
4304	50	FMT	4303	50		INACTIVE
4305	50	FMT	4304	50		
4306	50	FMT	4305	50		INACTIVE
4307	50	FMT	4306	50		
4308	50	FMT	4307	50		INACTIVE
4309	50	FMT	4308	50		
4310	50	FMT	4309	50		INACTIVE
4311	50	FMT	4310	50		
4312	50	FMT	4311	50		INACTIVE
4313	50	FMT	4312	50		
4314	50	FMT	4313	50		INACTIVE
4315	50	FMT	4314	50		
4316	50	FMT	4315	50		INACTIVE
4317	50	FMT	4316	50		
4318	50	FMT	4317	50		INACTIVE
4319	50	FMT	4318	50		
4320	50	FMT	4319	50		INACTIVE
4321	50	FMT	4320	50		
4322	50	FMT	4321	50		INACTIVE
4323	50	FMT	4322	50		
4324	50	FMT	4323	50		INACTIVE
4325	50	FMT	4324	50		
4326	50	FMT	4325	50		INACTIVE
4327	50	FMT	4326	50		
4328	50	FMT	4327	50		INACTIVE
4329	50	FMT	4328	50		
4330	50	FMT	4329	50		INACTIVE
4331	50	FMT	4330	50		
4332	50	FMT	4331	50		INACTIVE
4333	50	FMT	4332	50		
4334	50	FMT	4333	50		INACTIVE
4335	50	FMT	4334	50		
4336	50	FMT	4335	50		INACTIVE
4337	50	FMT	4336	50		
4338	50	FMT	4337	50		INACTIVE
4339	50	FMT	4338	50		
4340	50	FMT	4339	50		INACTIVE
4341	50	FMT	4340	50		
4342	50	FMT	4341	50		INACTIVE
4343	50	FMT	4342	50		
4344	50	FMT	4343	50		INACTIVE
4345	50	FMT	4344	50		
4346	50	FMT	4345	50		INACTIVE
4347	50	FMT	4346	50		
4348	50	FMT	4347	50		INACTIVE
4349	50	FMT	4348	50		
4350	50	FMT	4349	50		INACTIVE
4351	50	FMT	4350	50		
4352	50	FMT	4351	50		INACTIVE
4353	50	FMT	4352	50		
4354	50	FMT	4353	50		INACTIVE
4355	50	FMT	4354	50		
4356	50	FMT	4355	50		INACTIVE
4357	50	FMT	4356	50		
4358	50	FMT	4357	50		INACTIVE
4359	50	FMT	4358	50		
4360	50	FMT	4359	50		INACTIVE
4361	50	FMT	4360	50		
4362	50	FMT	4361	50		INACTIVE
4363	50	FMT	4362	50		
4364	50	FMT	4363	50		INACTIVE
4365	50	FMT	4364	50		
4366	50	FMT	4365	50		INACTIVE
4367	50	FMT	4366	50		
4368	50	FMT	4367	50		INACTIVE
4369	50	FMT	4368	50		
4370	50	FMT	4369	50		INACTIVE
4371	50	FMT	4370	50		
4372	50	FMT	4371	50		INACTIVE
4373	50	FMT	4372	50		
4374	50	FMT	4373	50		INACTIVE
4375	50	FMT	4374	50		
4376	50	FMT	4375	50		INACTIVE
4377	50	FMT	4376	50		
4378	50	FMT	4377	50		INACTIVE
4379	50	FMT	4378	50		
4380	50	FMT	4379	50		INACTIVE
4381	50	FMT	4380	50		
4382	50	FMT	4381	50		INACTIVE
4383	50	FMT	4382	50		
4384	50	FMT	4383	50		INACTIVE
4385	50	FMT	4384	50		
4386	50	FMT	4385	50		INACTIVE
4387	50	FMT	4386	50		
4388	50	FMT	4387	50		INACTIVE
4389	50	FMT	4388	50		
4390	50	FMT	4389	50		INACTIVE
4391	50	FMT	4390	50		
4392	50	FMT	4391	50		INACTIVE
4393	50	FMT	4392	50		
4394	50	FMT	4393	50		INACTIVE
4395	50	FMT	4394	50		
4396	50	FMT	4395	50		INACTIVE
4397	50	FMT	4396	50		
4398	50	FMT	4397	50		INACTIVE
4399	50	FMT	4398	50		
4400	50	FMT	4399	50		INACTIVE
4401	50	FMT	4400	50		
4402	50	FMT	4401	50		INACTIVE
4403	50	FMT	4402	50		
4404	50	FMT	4403	50		INACTIVE
4405	50	FMT	4404	50		
4406	50	FMT	4405	50		INACTIVE
4407	50	FMT	4406	50		
4408	50	FMT	4407	50		INACTIVE
4409	50	FMT	4408	50		
4410	50	FMT	4409	50		INACTIVE
4411	50	FMT	4410	50		
4412	50	FMT	4411	50		INACTIVE
4413	50	FMT	4412	50		
4414	50	FMT	4413	50		INACTIVE
4415	50	FMT	4414	50		
4416	50	FMT	4415	50		INACTIVE
4417	50	FMT	4416	50		
4418	50	FMT	4417	50		INACTIVE
4419	50	FMT	4418	50		
4420	50	FMT	4419	50		INACTIVE
4421	50	FMT	4420	50		
4422	50	FMT	4421	50		INACTIVE
4423	50	FMT	4422	50		
4424	50	FMT	4423	50		INACTIVE
4425	50	FMT	4424	50		
4426	50	FMT	4425	50		INACTIVE



centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam



"EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS DE AGUA
SUBTERRANEA"

"CONSIDERACIONES PRINCIPALES PARA LA PLANTACION DE
ABASTECIMIENTOS DE AGUA"

Ing. Carlos Antonio Buerba Franco *

Agosto, 1980.



INTRODUCCION

Sin un adecuado abastecimiento de agua las ciudades no podrían existir, o la vida en ellas sería difícil y peligrosa. A través de la historia las comunidades humanas se han preocupado de sus sistemas de abastecimiento de agua; así las ciudades antiguas encontraron que cuando las fuentes de abastecimiento locales, como ríos y manantiales, eran insuficientes para satisfacer las más modestas demandas del día, los habitantes construían acueductos los cuales podían traer agua de fuentes distantes. Los ingenieros que hacían el diseño de los referidos acueductos laboraban con severas dificultades debido a que no existían tubos que pudieran soportar aún presiones moderadas, por lo que las aguas se conducían por gravedad siguiendo la línea de gradiente hidráulico.

En el siglo XVII se hicieron los primeros experimentos con tubos de hierro forjado, pero no fue hasta mediados del siglo XVIII que estos tubos se abarataron lo suficiente para ser empleados en el diseño de conducciones. Este avance, junto con el mejoramiento de métodos de bombeo, hizo económicamente posible que se construyeran más y mejores sistemas de abastecimiento de agua.

Aún cuando algunas poblaciones fueron capaces de obtener agua en buenas condiciones de uso, reduciendo así las enfermedades, muchas otras encontraron que sus abastecimientos estaban contaminados y que el peligro aumentaba conforme la población crecía. Por tanto, procedimientos para el tratamiento del agua se fueron desarrollando, los cuales cuando se aplican correctamente reducen la incidencia de enfermedades.

En la figura 1 se presenta un diagrama con las interrelaciones de las componentes de un moderno sistema de abastecimiento.

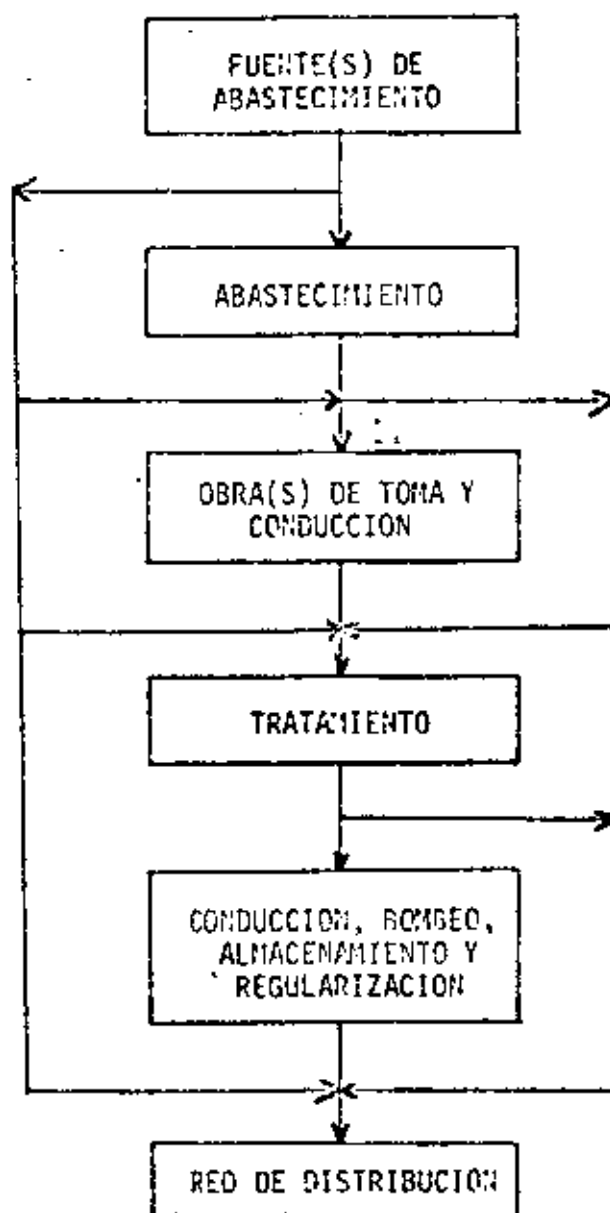


FIGURA 1. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DISTINTOS ELEMENTOS EN UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

I. ELEMENTOS EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

A. FUENTES DE ABASTECIMIENTO

1. Agua Superficial
2. Agua Subterránea
3. Agua de Lluvia

B. OBRAS DE TOMA

1. En Ríos
2. En Embalses
3. En Estanques, Lagunas y Lagos
4. En Aguas Subterráneas
5. Para Agua de Lluvia

C. CONDUCCIONES

1. Canales
2. Acueductos
3. Tuberías

D. TRATAMIENTO

E. SISTEMAS DE BOMBEO

F. ALMACENAMIENTOS

G. RED DE DISTRIBUCION

3

CONSIDERACIONES PRINCIPALES PARA LA PLANEACION DE ABASTECIMIENTOS DE
AGUA

A) FUENTES DE ABASTECIMIENTO

Son los aprovechamientos hidráulicos susceptibles de ser empleados en la obtención de agua para usos municipales o domésticos.

El tipo de fuente de abastecimiento determina, generalmente, la naturaleza de las obras de colección, purificación, conducción y distribución. Las fuentes más comunes de abastecimiento son:

A.1) Agua Superficial

a) De ríos. Para aprovechar las aguas de una corriente deben tenerse los aforos de varios años, para conocer sus volúmenes medio anual, máximo y mínimo.

De estos estudios se deduce si se podrá tomar el agua, directamente de un cauce, o habrá necesidad de construir una cortina para embalsarla en una presa de almacenamiento para regular el flujo.

b) De embalse. Los cuales, como se mencionó anteriormente, son construidos para regular el aprovechamiento del agua, cambiando el régimen del río, cuando el caudal mínimo de la corriente es menor que el requerido para el sistema de abastecimiento.

c) De estanques, lagunas y lagos, de suficiente tamaño para suministrar los volúmenes requeridos por el sistema de abastecimiento. Por lo que se deberán hacer estudios de las fluctuaciones en los niveles de agua durante las estaciones

del año.

A.2) Agua subterránea

Las aguas subterráneas se extraen de diversas formaciones geológicas: en estas formaciones el agua se deposita para constituir, de acuerdo a la geología del lugar, acuíferos confinados y no confinados.

Las aguas subterráneas aparecen en los siguientes tipos de formaciones geológicas:

- a) Los poros de depósitos aluviales (arrastrados por las aguas), glaciales o eólicos (arrastrados por los vientos) de materiales granulares no consolidados, tales como arena y grava, y de materiales consolidados, como las areniscas.
- b) De los pasajes, cavernas y planos de fractura de soluciones en rocas sedimentarias, tales como piedra caliza, pizarra y esquisto.
- c) De las fracturas y fisuras de rocas ígneas.
- d) De combinaciones de estas formaciones geológicas consolidadas y no consolidadas.

A.3) Agua de Lluvia

El agua de lluvia es raramente empleada como fuente de abastecimiento, recurriendo a ella sólo cuando por escasez o mala calidad de las aguas superficiales y subterráneas, o por razones económicas, no existe otra alternativa. Su aprovechamiento está confinado a granjas y establecimientos rurales, generalmente en regiones semiáridas.

B) OBRAS DE TOMA

Las obras de toma consisten de aberturas, filtros o rejillas para dar acceso al flujo de agua, y de una conducción que transporta el agua hacia el sistema de abastecimiento.

En la localización y diseño de las obras de toma se deben considerar los siguientes puntos:

a) El tipo de fuente de abastecimiento y sus características propias.

Por ejemplo en las fuentes superficiales, se requiere conocer:

- La profundidad del cuerpo de agua.
- Las características y movimientos del fondo.
- La presencia de materia flotante, como troncos y vegetación.
- Efectos de las corrientes.
- Los efectos de tormentas y avenidas en el cuerpo de agua y la obra de toma.
- Requisitos para la navegación (si se aprovecha para la comunicación).

b) Las características de los alrededores de la obra de toma, incluyendo la localización de las fuentes de contaminación con respecto a la toma.

c) Colocar la obra de toma en el lugar y con la fuente de abastecimiento que garantice mayor seguridad de servicio continuo.

Las obras de toma comúnmente empleadas en las distintas fuentes de abastecimiento se describen a continuación.

8.1) Obras de Toma en Ríos

Para la captación de las aguas de un río, éstas se derivarán directamente - por gravedad, o se requerirá bombearlas. En ambas situaciones se construirá un canal derivador; en el cual, se colocarán a su entrada rejillas que impidan el paso de ciertos cuerpos voluminosos arrastrados por la corriente. Cuando se aplique el bombeo, el canal derivador funcionará como un cárcamo, con objeto el objeto de no exponer a la tubería de extracción a roturas o a golpes que pueden ser provocados por los cuerpos voluminosos antes mencionados. Se deberá tener cuidado de efectuar frecuentemente la limpieza de las rejillas de acceso, principalmente en la época de avenidas (ver figura 2).

B.2) Obras de Toma en Embalses

Es muy común que el agua almacenada en embalses varíe en calidad a distintos niveles; siendo usualmente deseable tomarla de aproximadamente un metro debajo de la superficie. Esto, aunado a las fluctuaciones del nivel del agua - las cuales son esperadas en los embalses, hace recomendable tener accesos o tomas a varias elevaciones. Cuando la presa es de materiales graduados, la obra de toma es usualmente una torre de concreto localizada del lado aguas arriba de la presa. Debe haber acceso a la torre para que las aberturas de las distintas tomas puedan ser manipuladas por medio de válvulas y compuertas (ver figura 3). Si la presa es de concreto, la obra de toma puede ser una especie de pozo construido en la misma estructura de la presa, haciendo las veces de la torre de casa de compuertas, con accesos a varias elevaciones también.

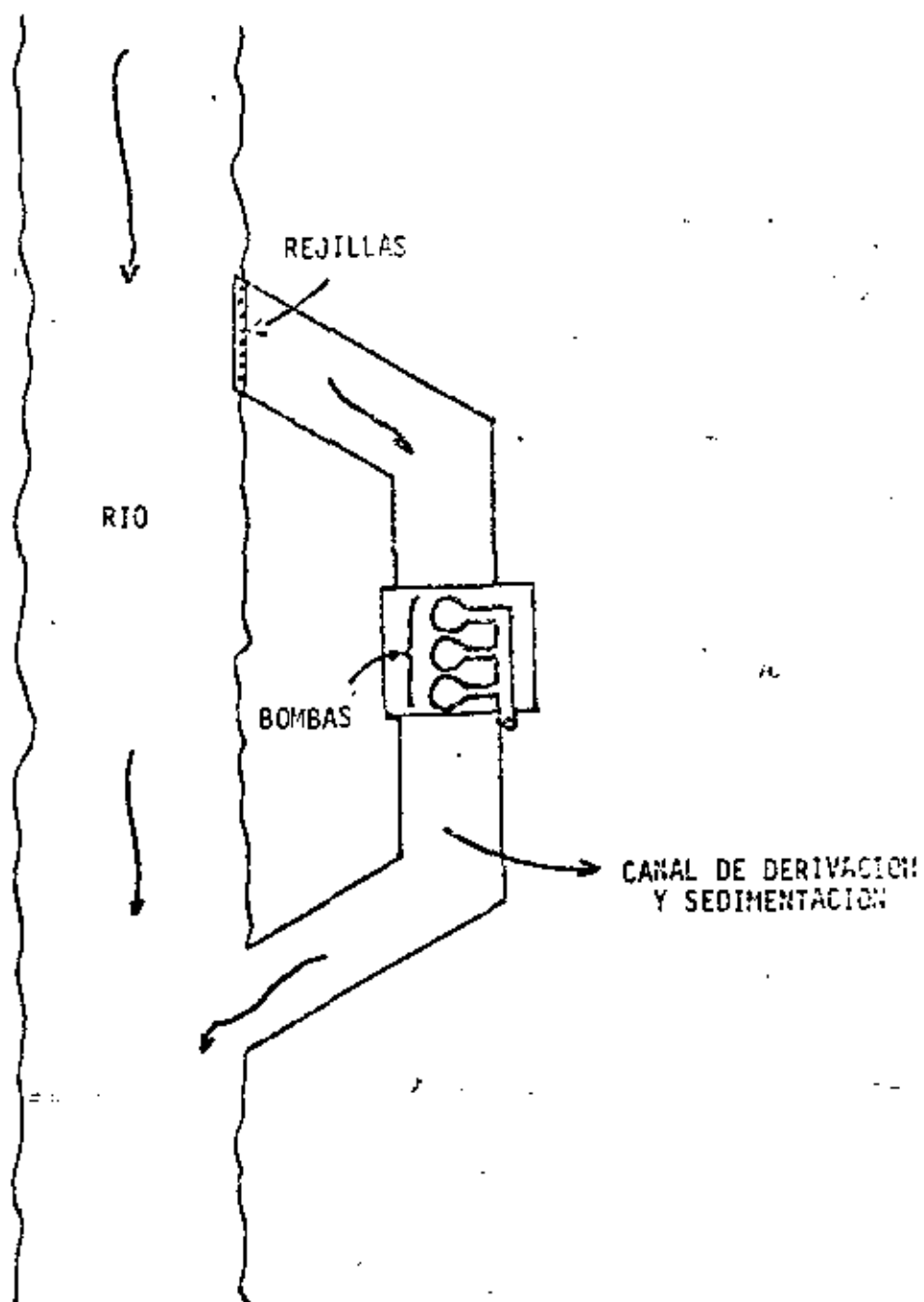


FIGURA 2. OBRA DE TOMA EN UN RIO

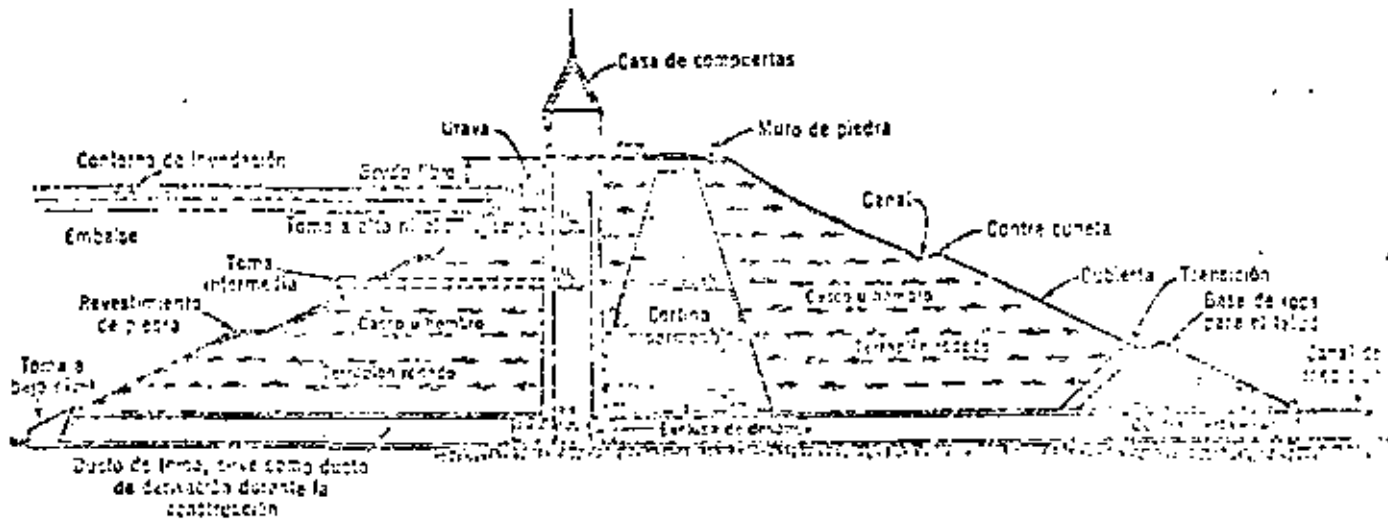


FIGURA 3. OBRA DE TOMA EN UN EMBALSE, CUANDO LA PPEA ES DE MATERIALES GRADUADOS

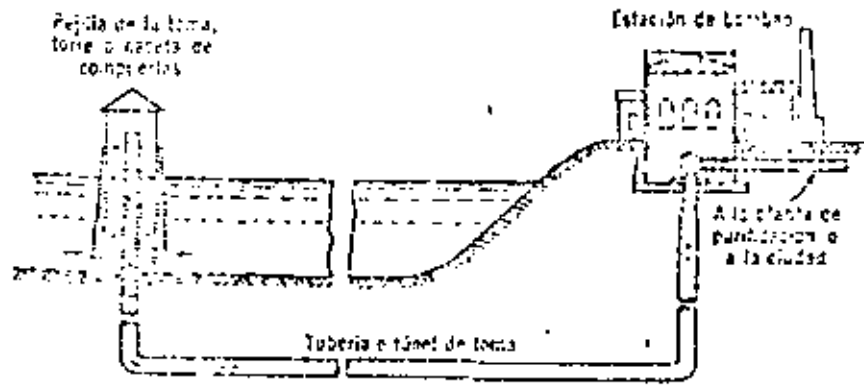


FIGURA 4. OBRA DE TOMA PARA CONSUMO DE AGUA PROCEDENTE DE LAGOS, LAGUNAS Y ESTANQUES

B.3) Obras de Toma en Estanques, Lagunas y Lagos . ✓

Las obras de toma en estas fuentes de abastecimiento incluyen ordinariamente una rejilla, casa de compuertas o torre de toma; un ducto de toma; y en muchos sitios, una estación de bombeo (figura 4).

B.4) Obras de Toma en Aguas Subterráneas

Las obras de toma en aguas subterráneas se pueden clasificar de acuerdo a las características que presentan los acuíferos que las contienen. Así las tomas pueden ser:

a) Manantiales

Los manantiales, normalmente, se aprovechan para captar el flujo natural de un acuífero. La clasificación de los manantiales se puede hacer de acuerdo con el tiempo que funcionan durante las estaciones del año; así tenemos que unos son perennes, y otros son periódicos o intermitentes. Por lo tanto, para poderlos usar, se necesita conocer el gasto medio anual y sus variaciones estacionales; mientras más constante sea su flujo, mejor será su aprovechamiento.

En todos los casos la salida de los manantiales debe protegerse para evitar que tenga contacto con el agua del exterior, y así su posible contaminación. Para regular su aprovechamiento, se construye un cárcamo de mampostería o concreto, el cual debe incluir las siguientes componentes: una salida al sistema de abastecimiento; un vertedor o tubo de demasas; y unas respiraderas para permitir los cambios libres del nivel sin producir cambios en la presión. Toda la obra se rodea de cunetas y contracunetas para evitar la infiltración

directa del agua superficial en época de lluvias (figura 5).

b) Pozos

Dependiendo de las formaciones geológicas a través de las que pasan y de su profundidad, los pozos son excavados, hincados, perforados, o barrenados en la tierra. Los pozos excavados (también conocidos como norias) e hincados están restringidos comúnmente a profundidades menores de 30 metros. Los suelos duros y la roca requieren generalmente pozos perforados o barrenados hasta profundidades de cientos de metros. Los pozos se pueden clasificar en someros, que son aquellos que únicamente llegan hasta los mantos freáticos, y profundos, que atraviesan una capa impermeable del terreno bajo los mantos freáticos para captar aguas confinadas.

Una vez captadas las aguas subterráneas en los pozos, éstas se bombean al exterior para su aprovechamiento (figura 7).

c) Galerías filtrantes

Las aguas subterráneas que se desplazan hacia las corrientes o lagos, procedentes de tierras altas vecinas, pueden ser interceptadas mediante galerías filtrantes; las cuales son excavaciones en túneles o a cielo abierto, que penetran en la zona de saturación del terreno, tendidas aproximadamente en ángulos rectos a la dirección del flujo, para coleccionar por gravedad el agua del subsuelo (ver figura 6).

En la figura 8 se presentan esquemáticamente las fuentes de agua subterránea y su aprovechamiento como manantiales, pozos y galerías filtrantes.

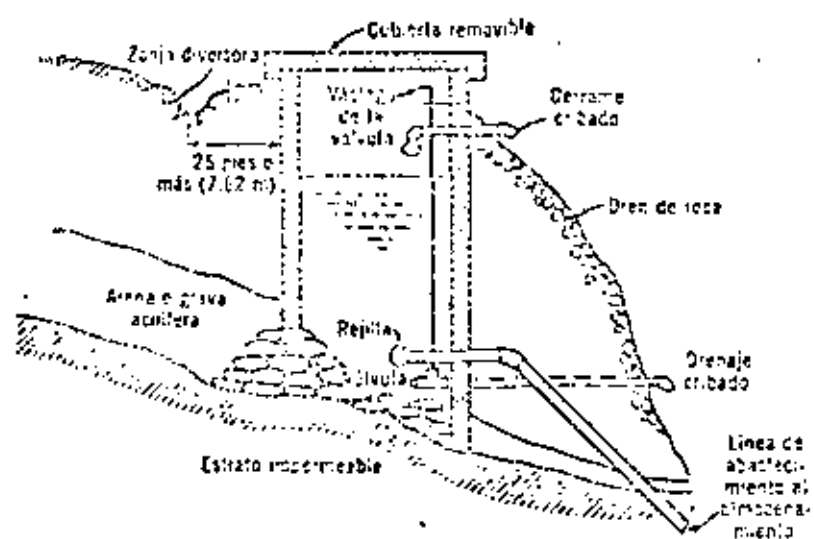


FIGURA 5. OBRA DE TOMA PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA PROCEDENTE DE UN MANANTIAL

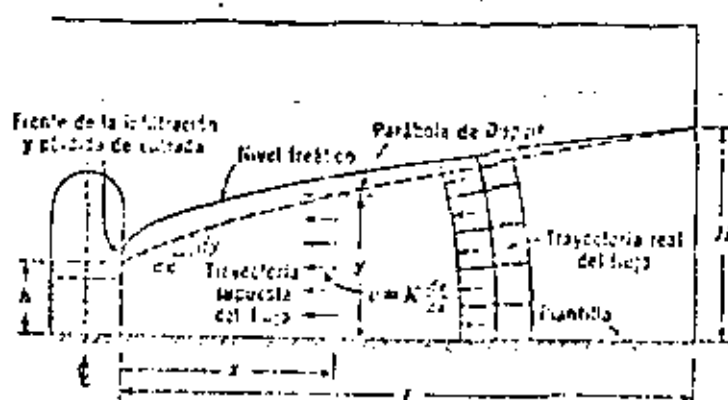


FIGURA 6. GALERÍA FILTRANTE PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA DEL SUBSUELO

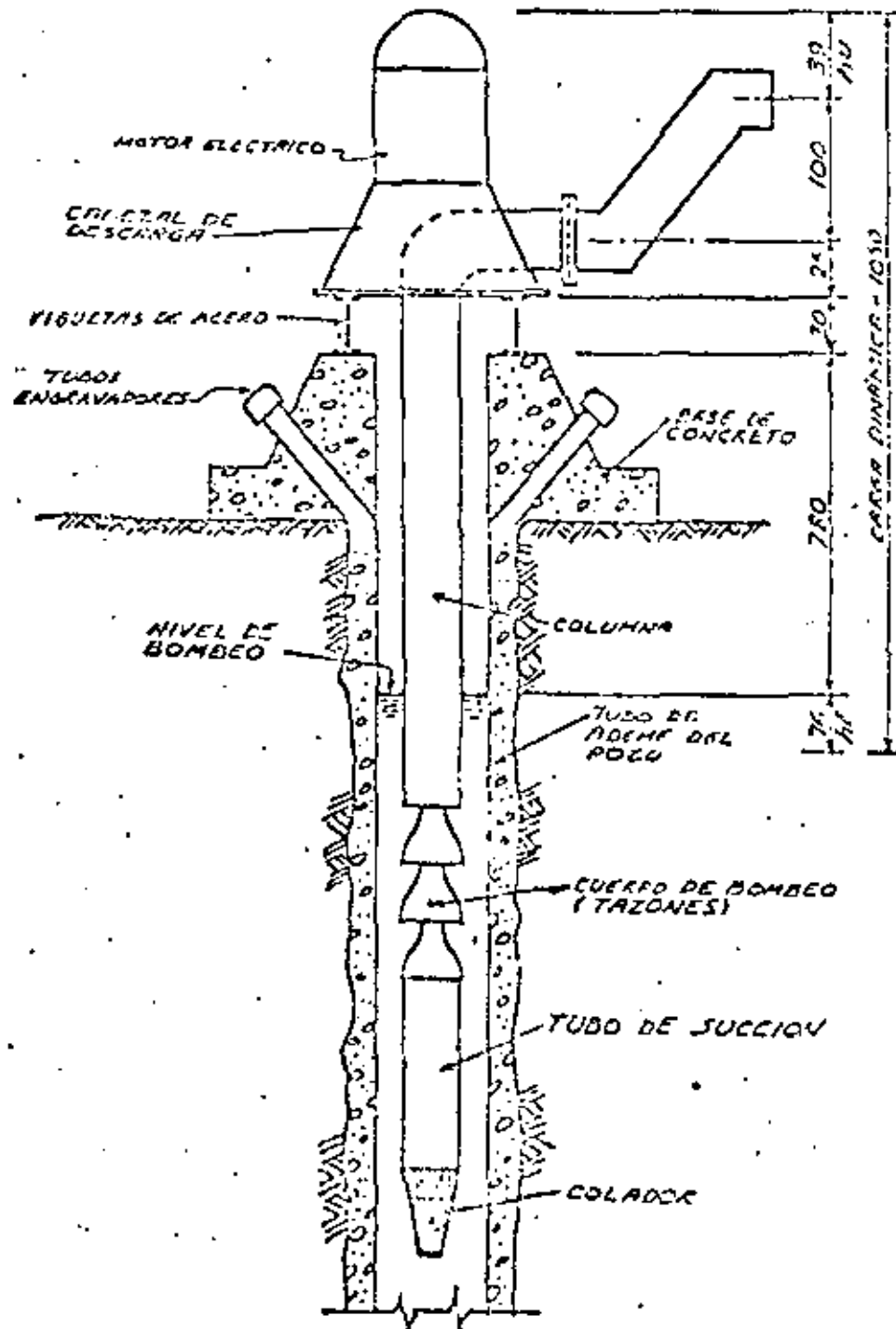


FIGURA 7. DISPOSICION DEL EQUIPO DE BOMBEO INSTALADO EN UN POZO

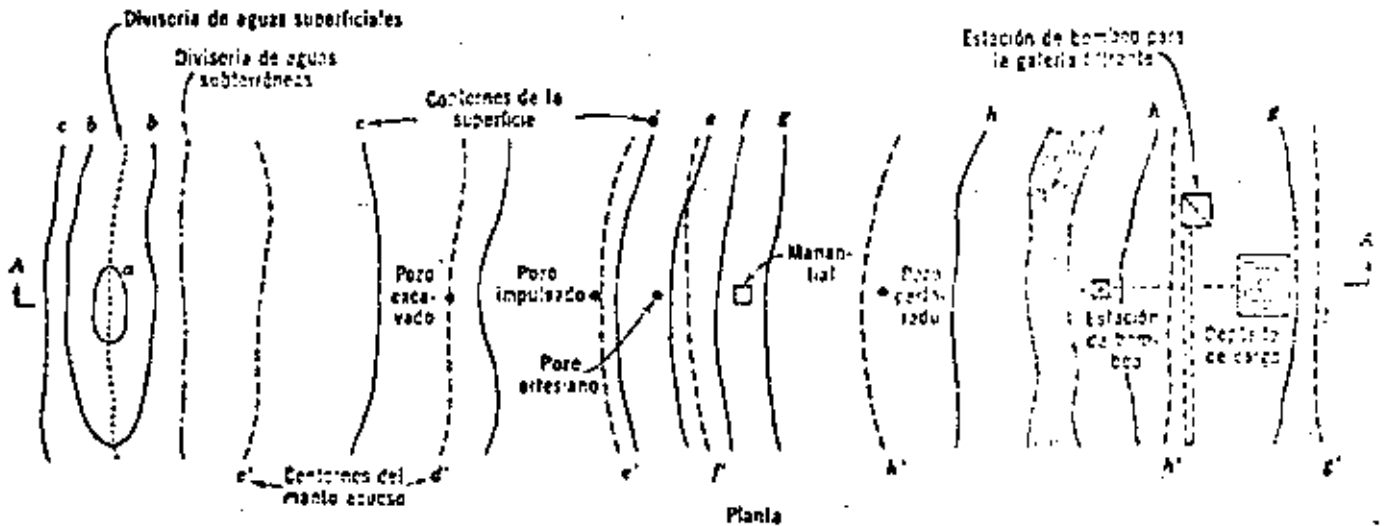
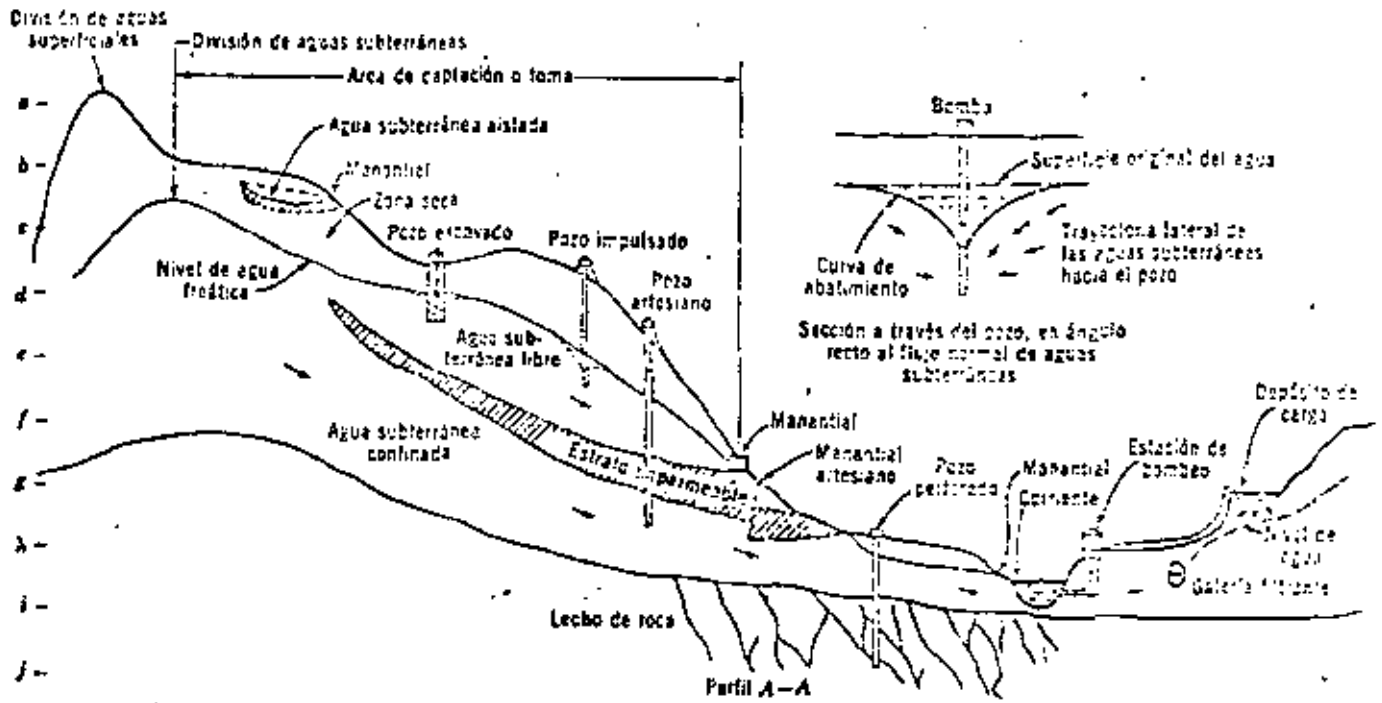


FIGURA 8. AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SU APROVECHAMIENTO COMO MANANTIALES, POZOS Y GALERÍAS FILTRANTES

B.5 Obras de Toma para Agua de Lluvia

El agua de lluvia se colecta como escurrimiento superficial de los techos, o superficiales impermeables, para su posterior almacenamiento en cisternas.

La capacidad de las cisternas se calcula tomando en cuenta el tiempo que dura la temporada de lluvias, la precipitación media anual, el área de captación, y el consumo anual.

C) CONDUCCIONES

Para llevar el agua de las obras de toma al sistema de abastecimiento, así como para conducirla entre las distintas componentes del sistema, será necesaria la construcción e instalación de acueductos, tuberías o canales. A continuación se discutirá cada uno de los tipos de conducción antes mencionados y los materiales usados más comunes.

C.1) Canales

Los canales son ocasionalmente usados para conducir agua de la fuente de abastecimiento a una estación de bombeo o planta de tratamiento. Ellos tienen la ventaja de que en su construcción se emplean materiales baratos, además al ser abiertos se ahorra el costo de cubierta. Por otro lado, los canales tienen las siguientes desventajas: debido a que trabajan por gravedad, se debe seguir la línea de gradiente hidráulico; existe una pérdida de agua debida a infiltración y evaporación; hay peligro de contaminación del agua, especialmente en regiones populosas; ganado, raíces de árboles y hoyos de animales salvajes, pueden causar daños serios a la conducción.

Las secciones usadas son el semi-círculo y el medio-hexágono o alguna otra forma de trapecoide. El medio-hexágono, siendo la sección más eficiente hidráulicamente, es el más empleado. El que los canales se revistan o no depende de la naturaleza del suelo, las velocidades de diseño y el valor del agua. Ha dado buenos resultados, para pendientes 1 vertical a 1.5 horizontal, o más planas, un revestimiento de 5 cm de espesor. Para pendientes mayores pueden necesitarse revestimientos de mayor espesor (de 10 a 15 cms) y con acero de refuerzo.

C.3) Acueductos

El término acueducto es usualmente restringido a conductos cerrados de mampostería o concreto, construidos en sitio. Los tipos usados pueden ser clasificados como:

- a) Corte y cubierta a la línea de gradiente hidráulico.
- b) Corte y cubierta, debajo de la línea de gradiente hidráulico y por tanto trabajando a presión.
- c) Túnel a la línea de gradiente hidráulico.
- d) Túnel debajo de la línea de gradiente hidráulico y trabajando a presión.

La alternativa al acueducto es la tubería, la cual emplea conductos manufacturados en un lugar distinto al sitio de la construcción. Las ventajas del acueducto sobre la tubería son:

- a) La posibilidad de usar materiales locales, tales como arena y grava para el concreto.
- b) Mayor duración del concreto y la mampostería que de conductos metálicos.
- c) Menores pérdidas en la capacidad de conducción con la edad.

Estas ventajas pueden resultar en un menor costo inicial el cual, que combinado con un menor costo de mantenimiento, implicaría una instalación más económica que si fuera una tubería. Existen algunas desventajas también:

- a) El conducto debe ser construido a su total capacidad de una sola vez, mientras que en las tuberías se pueden añadir líneas paralelas conforme crecen las necesidades.

- b) En algunas ocasiones, el balance de cortes y rellenos coloca a los acueductos en la superficie del terreno, causando interferencia con el drenaje natural.

Los acueductos son usualmente construidos en sección de herradura, una forma que tiene buenas propiedades hidráulicas:

- a) Es estable
- b) Resiste bien los empujes de tierra.
- c) Es económica en el uso de los materiales
- d) Es sencilla de construir

El fondo es frecuentemente redondeado para facilitar la limpieza; tomar la presión de la carga de agua; y el empuje de tierra lateral en el fondo y las paredes laterales. Los primeros acueductos fueron hechos de piedra o tabique, pero la construcción moderna utiliza concreto reforzado.

Los túneles que no trabajan bajo presión son también generalmente construidos en forma de herradura. Si están trabajando bajo presión, se usan secciones circulares. La profundidad a la que se encuentren estos túneles bajo presión, debe ser tal que el peso del material que los cubre soporte sus presiones internas.

C.3) Tuberías

Cuando las tuberías son usadas para conducir grandes cantidades de agua, sirven para los mismos propósitos que los canales y los acueductos mencionados previamente. Cuando reciben este uso, las tuberías se pueden construir de

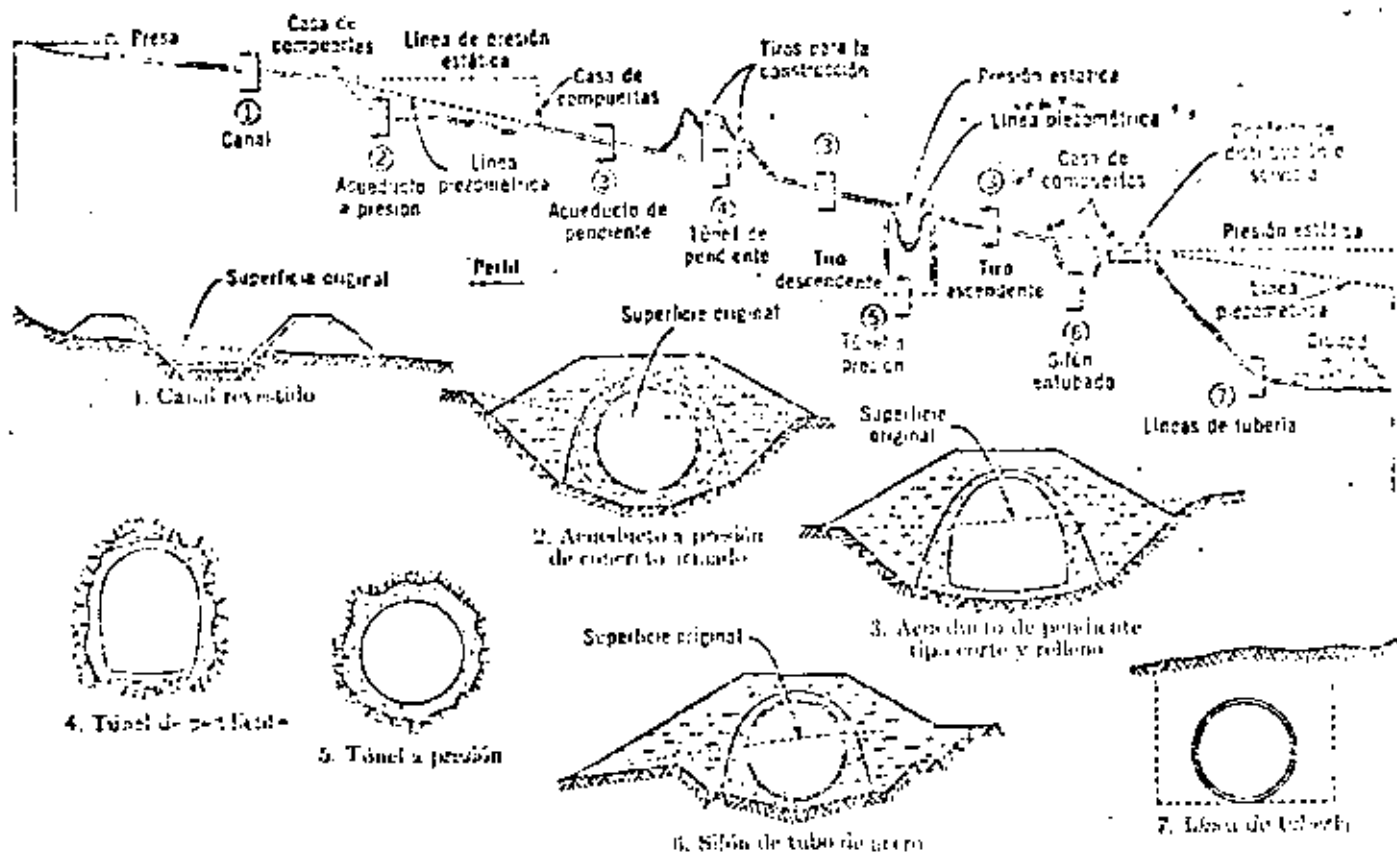
concreto reforzado, hierro fundido, o acero. Para la conducción del agua en una red de distribución también se usan tubos; en este caso los tubos son de varias medidas, teniendo muchas conexiones y ramales. Los materiales más usados para los tubos de una red de distribución son hierro fundido, acero, abasto-cemento y en algunos casos plástico.

La tubería debe seguir, en lo posible, el perfil del terreno, y su localización se escoge que sea la más favorable con respecto al costo de construcción y presiones resultantes. Se debe prestar especial atención a la línea de gradiente hidráulico, ya que, mientras más cercana esté la conducción a esta línea menor será la presión en los tubos, esta condición puede resultar en un ahorro en el costo de la tubería. En ocasiones, altas presiones internas se pueden eliminar rompiendo la línea de gradiente hidráulico con la instalación de almacenamientos auxiliares, como embalses o canales. Las velocidades en la tubería deben ser lo suficientemente grandes para prevenir que se depositen sedimentos en ella; comúnmente, velocidades mínimas de 0.6 a 0.8 m/seg son satisfactorias para este propósito. Para evitar el golpe de ariete, provocado por el rápido cierre de la tubería en su extremo final, se instala un pozo de oscilación cerca del sitio de cierre de la tubería.

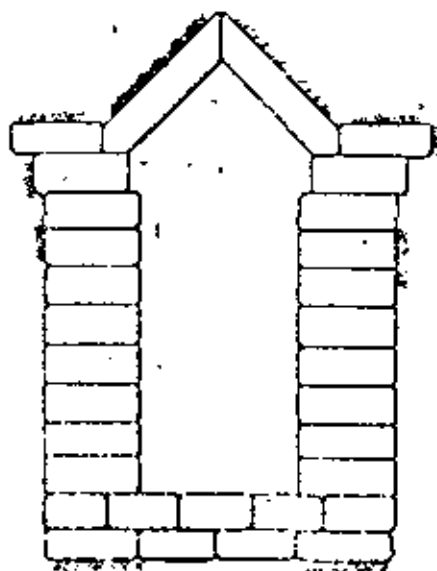
Cuando la tubería pasa por debajo de un valle, corriente, estuario de mareas, u otra depresión en la superficie de la tierra, así como bajo alguna otra obstrucción en su trayectoria, se le llama tubo invertido, tubo deprimido, o sifón invertido.

Para la selección del tipo de tubería a ser empleada se deben tomar en cuen

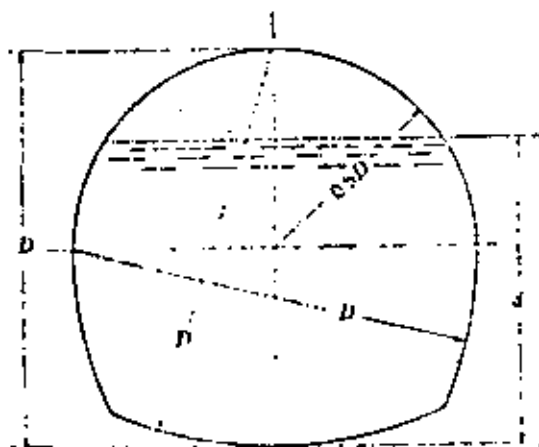
la capacidad de conducción, la durabilidad, el costo de mantenimiento y el costo inicial.



PERFIL DE SECCIONES TRANSVERSALES TÍPICAS DE UN CONDUCTO PARA APROVECHAMIENTO DE AGUA



ANTIGUO ACUEDUCTO DE MAIPOSTERIA



SECCION DE HERRADURA PARA TUNELES DE ACUEDUCTO

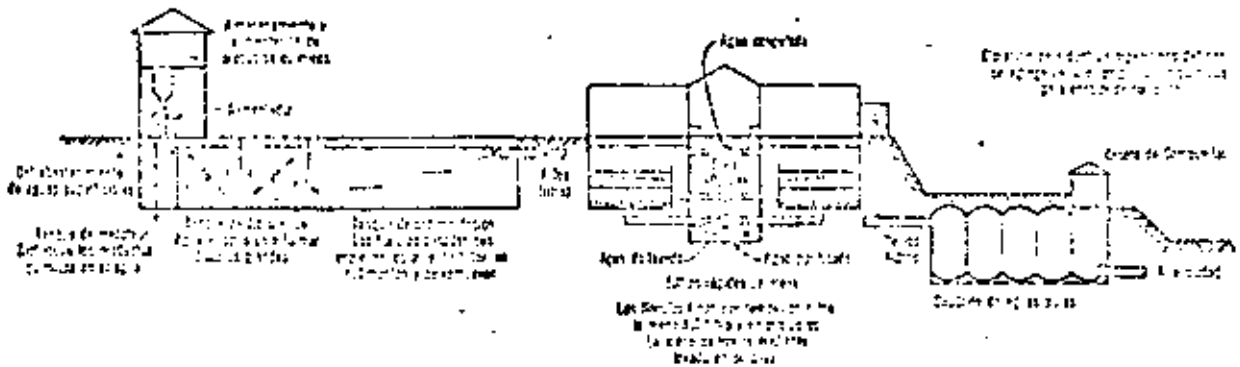
D) TRATAMIENTO

En general, si el agua para un sistema de abastecimiento proviene de fuentes superficiales, una planta de tratamiento será necesaria. En algunos casos, el agua subterránea también es tratada, para darle la calidad requerida para su consumo.

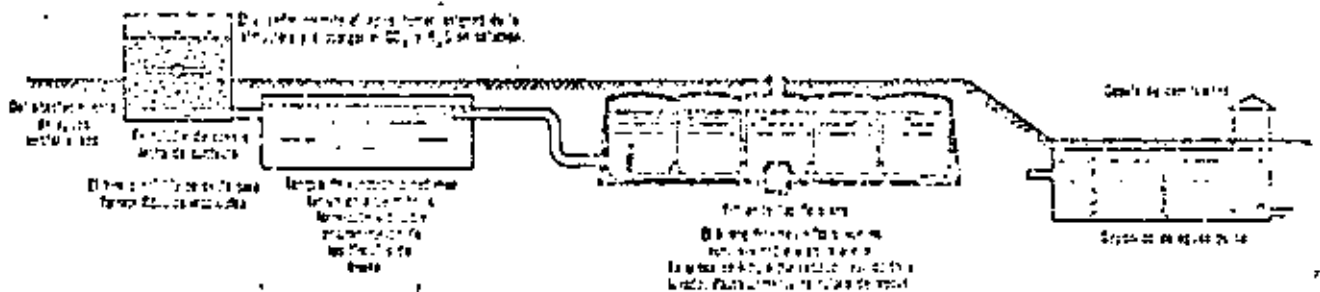
Es deseable tratar el agua para lograr la remoción de:

- a) Organismos patógenos
- b) Sabores y olores desagradables
- c) Excesivo color o turbiedad
- d) Ciertos minerales disueltos
- e) Una variedad de sustancias químicas desagradables o potencialmente peligrosas.

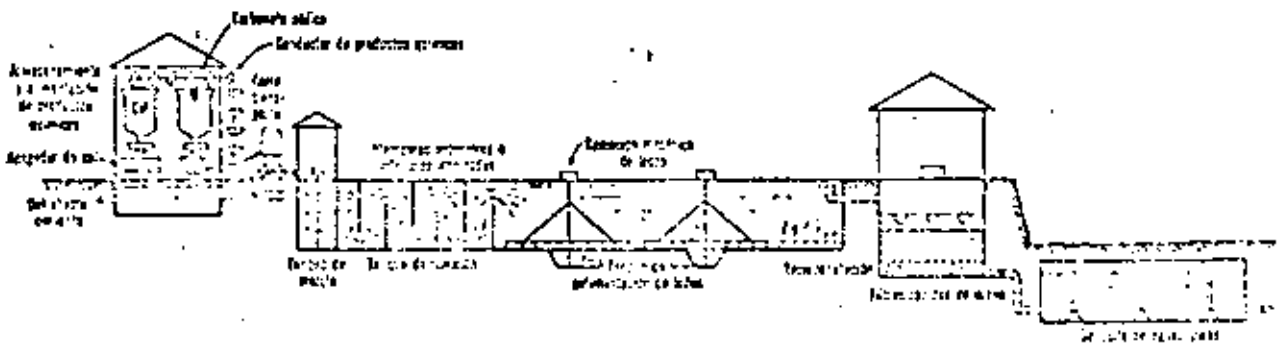
Se han desarrollado diversos métodos de tratamiento para obtener agua de distintas calidades. El tipo y grado de tratamiento dependerá de la naturaleza del agua, y por lo tanto de su fuente de abastecimiento. Las aguas superficiales son propensas a estar contaminadas bacteriológicamente y con más o menos turbiedad. Ellas comúnmente requerirán los procesos de coagulación, sedimentación, filtración y desinfección. En la figura 9 se muestran distintas etapas de tratamiento del agua. Las aguas subterráneas son en general claras, y por tanto pueden no requerir filtración si no existen sustancias químicas precipitables; pero es deseable, de cualquier forma, filtrar el agua después de la remoción del hierro y del manganeso, o de la reducción en la concentración del óxido de calcio para lograr una alta calidad del agua proveniente de fuentes de abastecimiento subterráneas.



a) PROCESOS DE COAGULACION, SEDIMENTACION, CLORACION Y CONTROL DE CORROSION



b) PROCESOS DE DESFERRIZACION INCLUYENDO AERACION, TRATAMIENTO POR CONTACTO Y FILTRACION



c) PROCESOS DE ABLANDAMIENTO INCLUYENDO ADICION DE PRODUCTOS QUIMICOS SUAVIZADORES, RECARBONACION Y FILTRACION.

FIGURA 9. PROCESOS USADOS PARA LA PURIFICACION DE AGUAS.

E) SISTEMAS DE BOMBEO

Las bombas y la maquinaria para bombeo en los sistemas de abastecimiento de agua sirven para los siguientes propósitos:

a) Elevar el agua desde la fuente (superficial o subterránea), ya sea en forma inmediata a la red de distribución; a almacenamientos localizados a gran elevación; a plantas de tratamiento.

b) Elevar el agua, dentro de la red de distribución, desde las áreas de servicio a baja elevación a las de servicio a alta elevación; a servicios separados o de incendio; a los pisos superiores de los edificios de plantas múltiples.

c) Transportar el agua a través de las plantas de tratamiento drenando los tanques componentes de sedimentación y otras unidades de tratamiento, desalojando sólidos depositados, alimentando agua (especialmente a presión) al equipo de operación, y bombeando soluciones de compuestos químicos a las unidades de tratamiento.

F) ALMACENAMIENTOS

La instalación de tanques o depósitos en un sistema de abastecimiento tiene dos funciones principales:

- a) Regularización
- b) Almacenamiento

Los tanques de regularización modifican el régimen del flujo de agua, proveniente de una fuente de abastecimiento, para ajustarlo al de los consumos requeridos en una red de distribución. La regularización permite asegurar el suministro de agua en horarios de alto consumo, mediante el uso del agua que se bombeó a los tanques durante las horas de baja demanda.

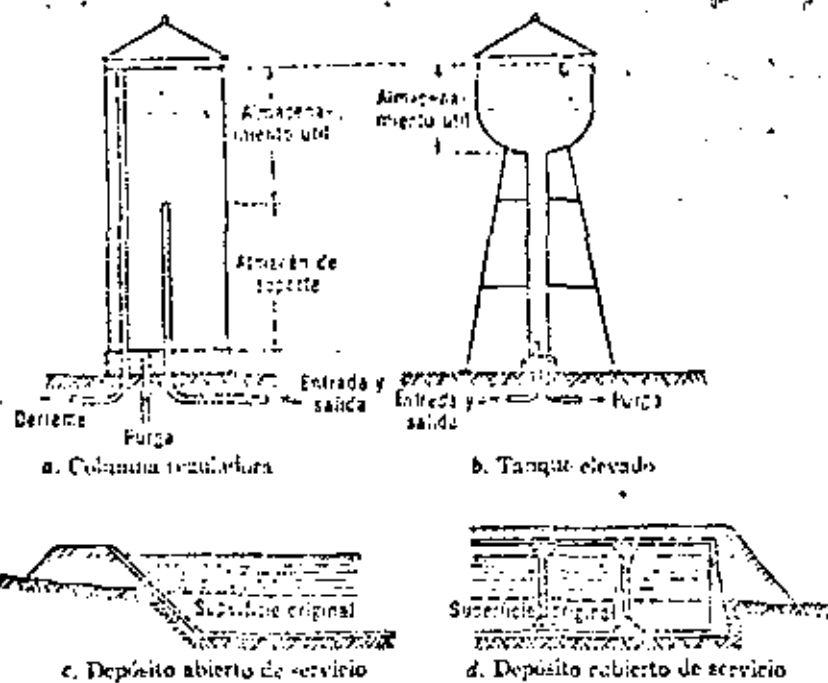
Los tanques de almacenamiento, además de regularizar el régimen del flujo de agua, retienen volúmenes de agua destinados a otros fines, como son:

- a) Reserva contra incendios
- b) Reserva para emergencias, como roturas en las líneas de conducción.

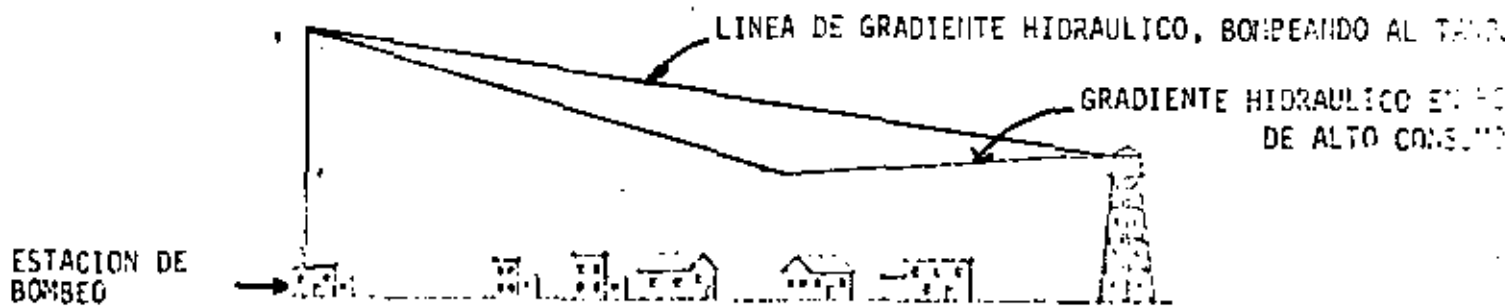
En poblaciones pequeñas, principalmente por razones económicas, no se considera el volumen contra incendio por resultar demasiado grande con respecto a las demandas regulares. Finalmente, es importante señalar que con los tanques también se logra mantener una determinada presión del agua en la red de distribución.

Los tanques pueden ser superficiales o elevados. Los tanques superficiales deben quedar en una zona lo suficientemente alta para mantener una presión ade

cuada en la red de distribución; por tanto, la localización del tanque que dará supeditada a la topografía del lugar. Los tanques elevados son aquellos que se construyen sobre torres, diseñadas para darle a los tanques la altura conveniente para sus funciones.



DEPOSITOS PARA ALMACENAMIENTO Y REGULACION DE SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.



ELEVACION DE LA LINEA DE GRADIENTE HIDRAULICO CON EL USO DE UN TANQUE ELEVADO.

G) RED DE DISTRIBUCION

Los sistemas de distribución para los abastecimientos públicos de aguas son redes de tuberías dentro de las redes de las calles. El trazo de las calles, la topografía, y la localización de las obras de abastecimiento y almacenamiento para servicio establecen el tipo del sistema de distribución y el carácter de su flujo.

Las redes están constituidas por tuberías principales, secundarias y de relleno; las principales alimentan a las secundarias y éstas a su vez las de relleno que son las que finalmente llevan el agua a las tomas domiciliarias. Una red se clasifica y se calcula tomando en cuenta únicamente a las tuberías principales.

De acuerdo a su configuración, las redes pueden ser abiertas o cerradas. Una red abierta está formada por una tubería principal con ramificaciones aisladas (figura 10.a). Una red cerrada está formada por circuitos intercomunicados (figura 10.b). Hidráulicamente el sistema cerrado presenta la ventaja de alimentar agua a cualquier punto desde más de una dirección y de eliminar los extremos muertos.

En una red deben instalarse piezas especiales, como son:

- a) Válvulas. Las cuales sirven para seccionar ciertos cruces o tramos, con el objeto de poder interrumpir el servicio en caso de efectuar reparaciones, cambios, o nuevas instalaciones.

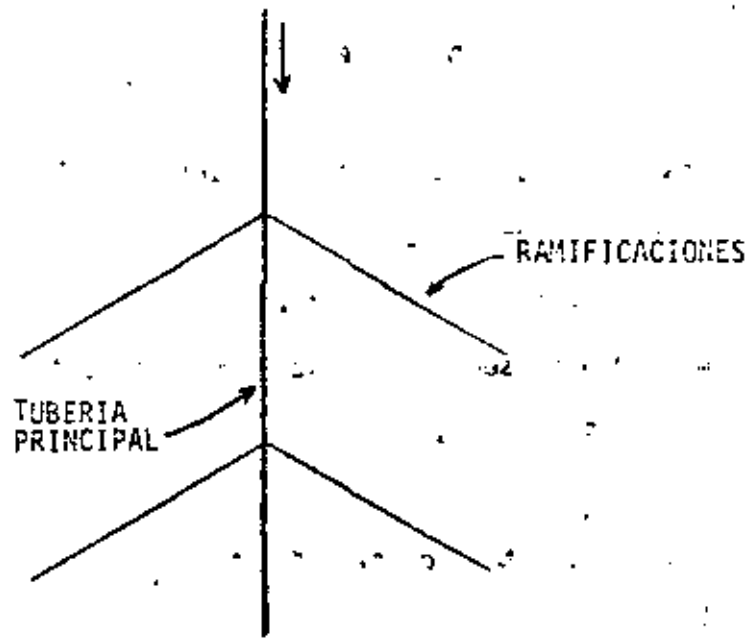


FIGURA 10.a. RED ABIERTA DE DISTRIBUCION DE AGUA

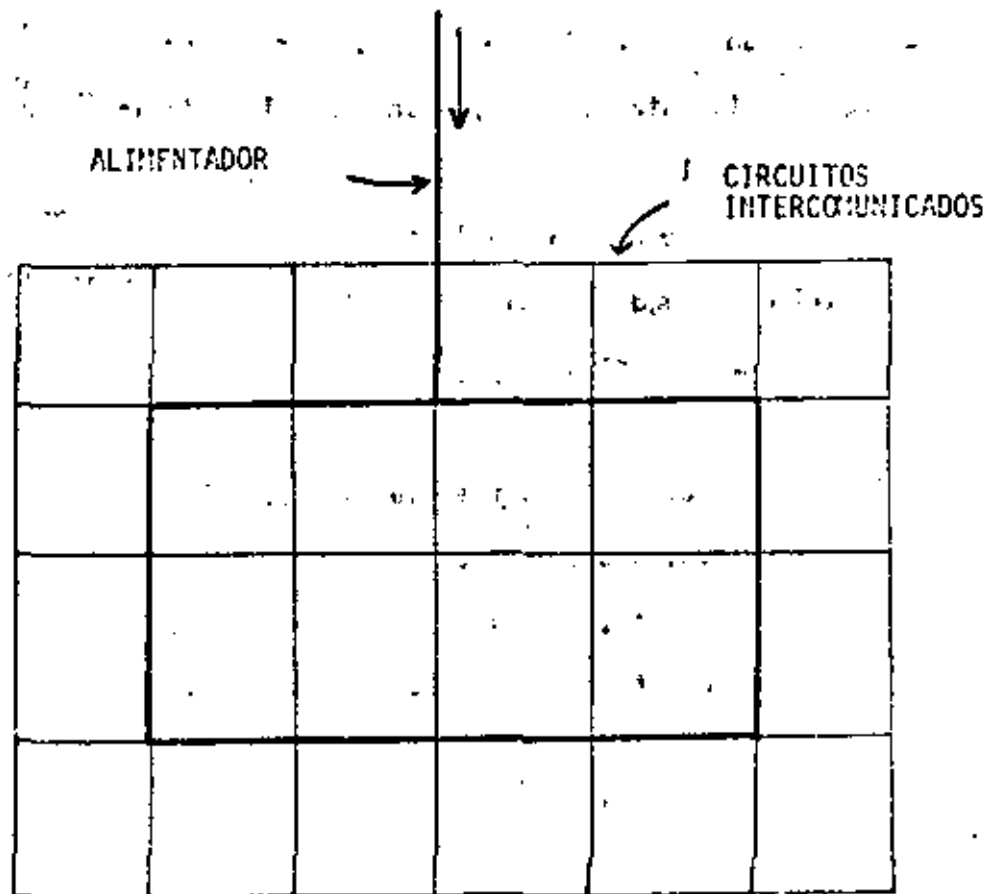
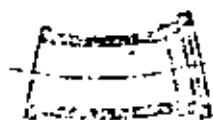
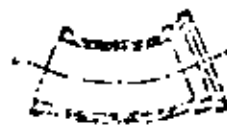


FIGURA 10.b. RED CERRADA DE DISTRIBUCION DE AGUA

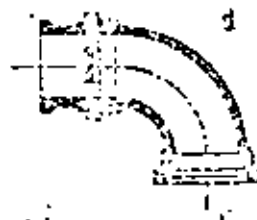
- b) Codos. Para los cambios de dirección de las tuberías.
- c) Cruces y tees: Para conectar las tuberías en los cruzamientos y las ramificaciones.
- d) Tubos cortos. Para ajustar las conducciones a una longitud determinada.
- e) Reducciones. Son piezas de sección trococónicas que sirven para unir tubos de distinto diámetro.
- f) Tapas ciegas. Son tapones que se colocan cuando un extremo de tubería no va a trabajar temporalmente.
- g) Juntas deslizantes y flexibles: para absorber esfuerzos debidos a cambios de temperatura, se instalan en las uniones de los tubos, juntas deslizantes que permiten movimientos longitudinales sin que se escape el agua. Otras juntas llamadas flexibles, permiten pequeños movimientos de un tubo con relación al contiguo.
- h) Medidores. Los cuales se emplean para medir las cantidades de agua usadas en las tomas domiciliarias.
- i) Hidrantes. Que permiten obtener una corriente de agua para combatir incendios, dentro de un cierto radio de acción.



CODO A 22.5°



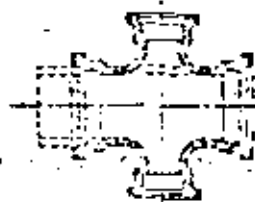
CODO A 45°



CODO A 90°



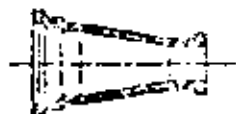
TE



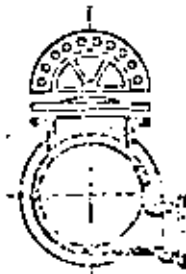
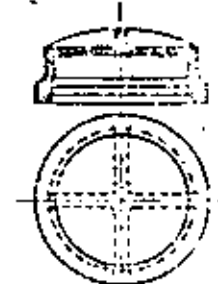
CRUZ



RAMIFICACION EN Y

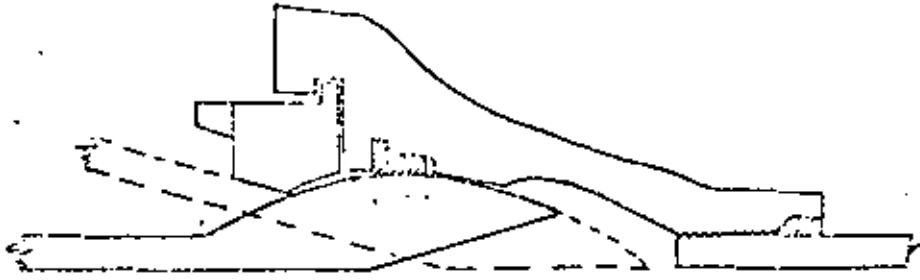


REDUCCION

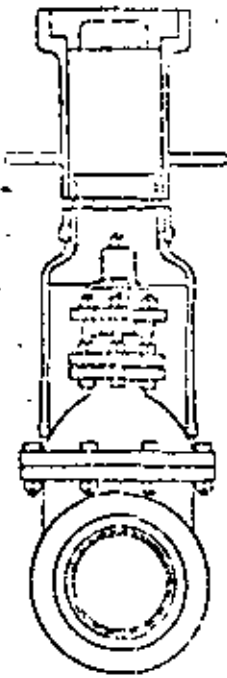
RAMIFICACION
DE SALIDA

TAPA CIEGA

PIEZAS ESPECIALES POR LA CONEXION DE LAS TUBERIAS EN UNA RED DE DISTRIBUCION DE AGUA.



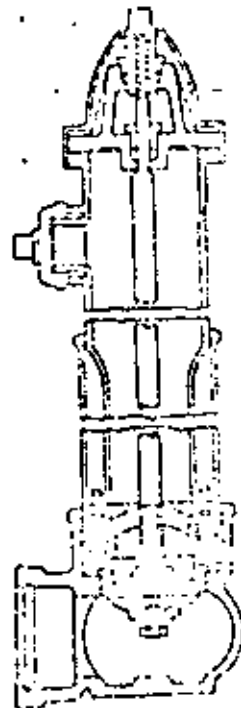
JUNTA FLEXIBLE PARA ALGUNAS TUBERIAS DE FIERRO FUNDIDO



VALVULAS DE COMPUERTA



MEDIDOR



HIDRANTE CONTRA INCENDIO

II. REQUERIMIENTOS Y DEMANDAS DE AGUA

A. CALCULO DEL CRECIMIENTO DE LA POBLACION

1. Estimaciones para los años presentes, próximos y pasados recientes.
2. Pronósticos de población para los periodos de diseño.

B. CONSUMOS DE AGUA

1. Dotación
2. Variación de las demandas de agua
3. Factores que afectan el consumo.

II. REQUERIMIENTOS Y DEMANDAS DE AGUA

En el diseño de sistemas de abastecimiento de agua es necesario estimar la cantidad de agua requerida. Esto implica el determinar la cantidad de gente que será servida y su consumo per cápita, junto con un análisis de los factores que pueden afectar el consumo.

A. CALCULO DEL CRECIMIENTO DE LA POBLACION

Previo al diseño de un sistema de abastecimiento, se debe establecer el tiempo que la obra servirá a la comunidad antes de que sea obsoleta o requiera ampliación. A este tiempo se le conoce como periodo de diseño, el cual tiene una importante influencia en la cantidad de fondos que se pueden invertir en la construcción del sistema de abastecimiento. El periodo de diseño depende principalmente de:

- a) La vida útil de las estructuras y el equipo componente, tomando en cuenta su duración y desgaste.
- b) La facilidad o la dificultad para hacer ampliaciones o adiciones a las obras existentes o planeadas, incluyendo una consideración de su localización.
- c) La estimación de la tasa de crecimiento de la población, considerando posibles cambios en las actividades industriales y comerciales de la comunidad.

La información más confiable sobre la población de una comunidad se puede obtener de los censos generales de población y vivienda, que realiza el gobierno de México cada 10 años, a partir de 1895, con excepción de los dos primeros que se hicieron con intervalo de 5 años y el cuarto que se llevó a cabo -

el año de 1921.

La población crece por nacimientos, decrece por muertes, crece o decrece por migración y aumenta por anexión. Cada uno de estos elementos está influido por factores sociales y económicos. Los cambios en los índices de natalidad y mortalidad pueden deberse a: avances en higiene maternal e infantil, que han reducido la mortalidad maternal e infantil; adelantos en la nutrición - que han incrementado la fertilidad y disminuido la incidencia de enfermedades infecciosas y otras deficiencias físicas; descubrimientos en la medicina que han reducido la prevalencia y fatalidad de las enfermedades infecciosas; fluctuaciones en la economía que han influenciado el aumento o declinación - de los índices de natalidad; guerras y desastres que afectan directamente a la población en general. Actualmente, el elemento más importante y menos - previsible del cambio de población es la actividad comercial e industrial. - Este puede producir aumentos bruscos, crecimientos lentos, condiciones estacionarias, o bien marcadas reducciones de población.

Si no existieran estas múltiples y variables influencias, los índices de natalidad y mortalidad tenderían a valores más o menos estables y las poblaciones seguirían la curva característica del crecimiento de los seres vivos, dentro de un espacio específico o con una oportunidad económica limitada. La curva antes referida tiene la forma de una S, como se muestra en la figura 11, verificándose un crecimiento temprano a un índice creciente y un crecimiento tardío a un índice decreciente conforme se alcanza un valor de saturación o límite superior.

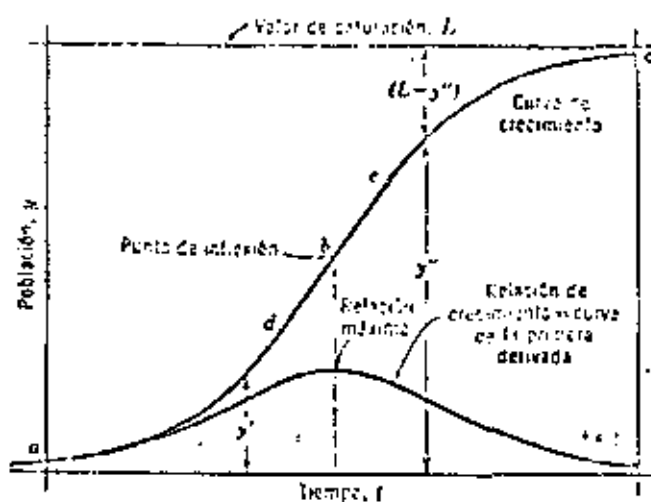
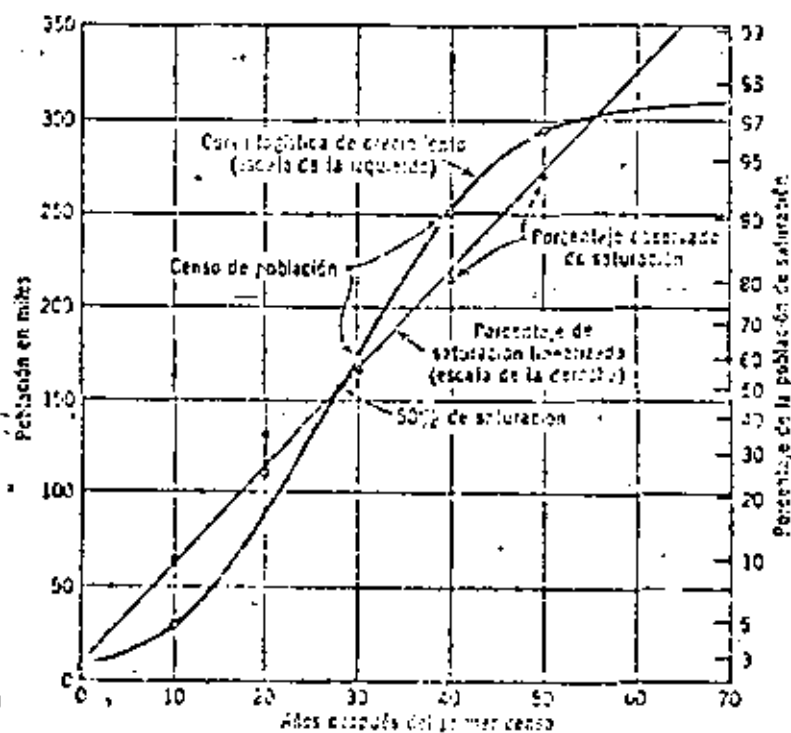


FIGURA 11. CURVA CARACTERÍSTICA DEL CRECIMIENTO DE LOS SERES VIVOS



CURVA LOGÍSTICA PARA PROYECTAR EL CRECIMIENTO DE LA POBLACION DE UNA COMUNIDAD

Para el manejo y diseño de los sistemas de abastecimiento de agua se requieren estimaciones de población para los años presentes, próximos y pasados recientes, así como pronósticos de población para los períodos de diseño.

A.1) Estimaciones para los años presentes, próximos y pasados recientes

Son aquellas realizadas para los años intercensales, o bien para los postcensales a partir del último censo. Mediante procedimientos aritméticos y geométricos se interpolan o extrapolan los valores de población de los censos, a mitad del año, para estimar los valores intercensales o postcensales.

a) Método aritmético

Este método está basado en la hipótesis de que la tasa de crecimiento es constante. Esta hipótesis se puede probar examinando el crecimiento de la comunidad, para determinar si incrementos aproximadamente iguales han ocurrido entre censos recientes. Matemáticamente esta hipótesis puede expresarse como:

$$\frac{dP}{dt} = K \dots \dots \dots (1)$$

en donde dP/dt es la tasa de crecimiento de la población con el tiempo y K es una constante que representa la pendiente de la recta de crecimiento de la población. K se determina gráficamente o analíticamente con la ecuación:

$$K = \frac{P_p - P_a}{t_p - t_a} \dots \dots \dots (2)$$

donde P_a es la población del censo anterior, P_p es la población del censo

ii) b)

posterior, t_a es la fecha del censo anterior y t_p es la fecha del censo posterior, obtenidas en censos sucesivos.

Entonces, la estimación aritmética de la población es:

i) para los años intermedios, entre los censos:

$$P_m = P_a + (K) (t_m - t_a) \dots \dots \dots (3),$$

en donde P_m es la población deseada a medio año y t_m es la fecha deseada.

ii) para los años posteriores, a partir del último censo:

$$P_m = P_p + (K) (t_m - t_p) \dots \dots \dots (4).$$

b) Método geométrico

La hipótesis de este método asume que la tasa de crecimiento es proporcional a la población:

$$\frac{dP}{dt} = QP \dots \dots \dots (5),$$

donde Q es una constante de proporcionalidad, la cual se puede calcular de la ecuación:

$$Q = \frac{\ln(P_p) - \ln(P_a)}{t_p - t_a} \dots \dots \dots (6).$$

Así, la estimación geométrica de la población resulta:

i) Para los años intermedios, entre los censos:

$$\ln(P_m) = \ln(P_a) + (Q)(t_m - t_a) \dots \dots \dots (7)$$

ii) Para los años posteriores, a partir del último censo:

$$\ln(P_m) = \ln(P_p) + Q(t_m - t_p) \dots \dots \dots (8)$$

A.2) Pronóstico de población para los periodos de diseño

Estos difieren de las estimaciones postcensales en que se busca obtener el posible crecimiento de una comunidad en un periodo largo, en lugar de las variaciones ocurridas a corto plazo. Se emplea el registro más completo posible de crecimiento de población. Los procedimientos para hacer pronósticos de población incluyen:

c) Método logístico

La curva logística usada en modelar el crecimiento de población tiene la forma de una S. La ecuación que describe a la curva logística es:

$$P = \frac{P_{sat}}{1 + (a) e^{(b)(\Delta t)}} \dots \dots \dots (9)$$

en donde P es la población a pronosticar en el futuro, P_{sat} es la población de saturación de la comunidad, a y b son coeficientes que se calculan a partir de los valores de población observados en tres censos consecutivos, e es

la base de los logaritmos naturales y Δt es el intervalo de tiempo que va desde el año del primero de los censos consecutivos observados hasta el año en que se busca hacer el pronóstico.

El valor de la población de saturación y los coeficientes de la curva logística se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$P_{\text{sat}} = \frac{2P_0P_1P_2 - P_1^2(P_0 + P_2)}{P_0P_2 - P_1^2} \quad (10)$$

$$a = \frac{P_{\text{sat}} - P_0}{P_0} \quad (11)$$

$$b = \left(\frac{1}{\Delta t_0} \right) \ln \left(\frac{P_0(P_{\text{sat}} - P_1)}{P_1(P_{\text{sat}} - P_0)} \right) \quad (12)$$

en las cuales P_0 , P_1 y P_2 son las poblaciones de tres censos sucesivos, y Δt_0 es el intervalo de tiempo entre los censos.

La hipótesis de crecimiento logístico se puede probar graficando los datos de población en una escala logística, en la que se tendrá una línea recta si la hipótesis es válida. La escala logística lleva en las abscisas al tiempo y en las ordenadas a la expresión:

$$\ln \left(\frac{100 - S}{S} \right) \quad (13)$$

donde S es el porcentaje de saturación de la población, obtenido como:

$$S = \frac{P}{P_{sat}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (14).$$

d) Método del crecimiento declinante

Esta técnica, como la del método logístico, supone que la comunidad tiene una población de saturación, y que su tasa de crecimiento es una función de su déficit de población:

$$\frac{dP}{dt} = R (P_{sat} - P) \quad \dots \dots \dots (15).$$

Una vez estimada la población de saturación con la ecuación 10, R puede determinarse con la expresión:

$$R = - \left(\frac{1}{\Delta t_0} \right) \ln \left(\frac{P_{sat} - P_1}{P_{sat} - P_0} \right) \quad \dots \dots \dots (16).$$

Entonces, para el cálculo de poblaciones futuras se aplica:

$$P = P_0 + (P_{sat} - P_0) (1 + e^{(R)(\Delta t)}) \quad \dots \dots \dots (17).$$

e) Método gráfico

Esta técnica consiste en hacer la proyección gráfica de la curva de crecimiento de población siguiendo la tendencia que indica la curva. Una variante de este método es la de comparar el crecimiento proyectado con el que ha ocurrido en otras ciudades de mayor tamaño. Las ciudades escogidas para la

comparación deben ser lo más similar posible a la ciudad en estudio; en la elección de las ciudades se deben considerar similitudes geográficas, económicas y sociales como pueden ser el clima, la proximidad de las ciudades, el tipo de actividades comerciales e industriales, los sistemas de transportación, y las costumbres.

B. CONSUMOS DE AGUA

B.1) Dotación

La dotación es la cantidad de litros que se asigna por habitante y por día; ésta se puede fijar en base a los distintos usos del agua:

- a) Doméstico
- b) Comercial
- c) Industrial
- d) Público
- e) Fugas y desperdicios, muy lamentables pero siempre frecuentes y difíciles de controlar.

Cada uno de estos usos representa un determinado porcentaje de la dotación. Para tener una idea de estos valores, en la tabla 1 se presentan los porcentajes dados por algunos autores.

B.2) Variación de las demandas de agua

El consumo de agua cambia con los meses del año, los días del mes, y las horas

TABLA 1.

PORCENTAJES MEDIOS DE LOS DIVERSOS USOS EN RELACION CON LA DOTACION TOTAL						
TIPO DE CONSUMO	INVESTIGADORES					PROMEDIO
	TURNEAURE*	BARBIT	STEEL	SALONITS	FAIR-GEYER	
DOMESTICO	45 - 35	34	31	50	35	38
COMERCIAL E INDUSTRIAL	22 - 30	38	38	14	45	31
PUBLICO	11 - 10	10	11	16	5	11
FUGAS Y DESPERDICIOS	22 - 25	18	20	20	15	20

* La primer columna de valores de Turneure se usa para dotaciones bajas y la segunda columna para dotaciones media y alta.

TABLA 2.

COEFICIENTE DE VARIACION DIARIA C_d Y HORARIA C_h		
CARACTERISTICAS	C_d	C_h
SITIOS DE CLIMA UNIFORME, EN LOS QUE SE CONSUME TODOS LOS DIAS LA MISMA CANTIDAD DE AGUA	1.20	1.40
SITIOS DE CLIMA VARIABLE, PERO NO EXTREMOSO	1.35	1.50
SITIOS DE CLIMA EXTREMOSO Y SECO	1.50	1.80
SITIOS DE CLIMA MUY EXTREMOSO, COMO LOS DESIERTOS	1.75	

del día, dependiendo de factores climatológicos, costumbres, actividades económicas y sociales, además de muchas otras causas. De las variaciones diarias y las variaciones horarias nos interesa conocer sus valores máximos normales, para tomarlos en cuenta en el diseño de un sistema de abastecimiento, y evitar la escasez de agua en los días y las horas de gran demanda. Las variaciones máximas diarias y horarias se expresan como un coeficiente del gasto medio anual, y dependen de condiciones climatológicas como pueden ser la temperatura y la distribución de las lluvias en la región. En la tabla 2 se presentan los coeficientes de variación diaria y horaria.

El volumen medio diario para consumo de una población se determina de la expresión:

$$V_{md} = \frac{D \times H}{1000} \quad (18),$$

donde V_{md} es el volumen medio diario de agua, en m^3 ; D es la dotación, en lt/hab/día; H es el número de habitantes; 1000 representa la cantidad de litros que hay en un metro cúbico.

El volumen medio anual se calcula de:

$$V_{ma} = \left(\frac{D \times H}{1000} \right) \times 365 = V_{md} \times 365 \quad (19),$$

en el cual V_{ma} es el volumen medio anual, en m^3 ; 365 es el número de días que tiene el año.

Para calcular el gasto medio diario se aplica la ecuación:

$$Q_{md} = \frac{D \times H}{86400} \quad (20)$$

en donde Q_{md} es el gasto medio diario, en lt/seg; 86400 es la cantidad de segundos que tiene un día.

El gasto máximo diario Q_{Md} , en lt/seg, se puede calcular multiplicando el gasto medio diario por el coeficiente de variación diaria C_d , así:

$$Q_{Md} = Q_{md} \times C_d \quad (21),$$

del mismo modo el gasto máximo horario, en lt/seg, se obtendrá de multiplicar el gasto medio diario por el coeficiente de variación horaria C_h , entonces:

$$Q_{Mh} = Q_{md} \times C_h \quad (22).$$

Finalmente, para el diseño de abastecimientos de agua es muy importante conocer el gasto máximo en el día de máximo consumo Q_{MM} , en lt/seg, entonces:

$$Q_{MM} = Q_{md} \times C_d \times C_h \quad (23).$$

B.3) Factores que afectan el consumo

Las variaciones en el consumo medio diario per cápita dependen de ciertos factores importantes, como:

- a) La cantidad de agua disponible.- La cual depende del tipo de fuente de abastecimiento.
- b) La calidad del agua.- Conforme se tiene una mejor calidad del agua, ésta se puede emplear en un mayor número de usos, lo que implica un aumento en la demanda.
- c) El costo del agua.- El aumento en el precio del líquido tiene un efecto temporal en la reducción del consumo, y después de pasado un cierto tiempo se vuelve a los consumos originales.
- d) La presión del agua.- Si las presiones en las tuberías de una red de distribución son muy altas o muy bajas, se incrementará el uso del agua; en el primer caso por fugas y en el segundo por desperdicios.
- e) La población.- La demanda de agua se incrementa conforme crece la población, siendo por tanto mayores las necesidades de agua.
- f) Actividades de la comunidad.- Según su actividad básica, las poblaciones se catalogan en:
 - i) Agrícolas
 - ii) Industriales
 - iii) ComercialesLas cuales engloban a las actividades secundarias, que son por ejemplo la minería, el turismo y los transportes.
- g) Nivel económico.- Mientras más alto es el nivel económico de la población, mayor será el consumo de agua, porque la gente se proporciona un mayor número de comodidades.
- h) Condiciones climatológicas.- Los cambios climatológicos, sobre todo en climas extremos, tienen una influencia directa en el consumo del agua.

Durante épocas de calor aumenta su demanda en baños, lavado de ropa, aire acondicionado, y riego de parques y jardines; en épocas de frío aumenta su empleo sobre todo en calefacción y fugas, cuando se llegan a romper algunas tuberías por congelación del agua.

III. PRINCIPIOS DE ANALISIS ECONÓMICOS DE SISTEMAS
ALTERNATIVOS

A. Evaluación Económica de Sistemas Alternativos

1. Alternativas
2. Comparación de Costos

B. Financiamiento del proyecto

III. PRINCIPIOS DE ANALISIS ECONOMICOS DE SISTEMAS ALTERNATIVOS

El desarrollo de proyectos de ingeniería para abastecimientos de agua requiere la evaluación económica de sistemas alternativos, para la selección del sistema más barato que satisfaga las demandas, y el planteamiento de un plan de financiamiento.

A. Evaluación económica de sistemas alternativos

A.1 Alternativas

No existe una solución única para el diseño de sistemas de abastecimiento de agua, y en el desarrollo de la mejor solución se busca la optimización de los objetivos del proyecto. Las decisiones, para ser significativas, deben identificar las ventajas y desventajas comparativas de los posibles diseños. En general la selección de las alternativas se hace en el terreno económico; cada alternativa considerada factible se debe expresar en unidades monetarias antes de tomar una decisión. Las componentes de los sistemas de abastecimiento son incommensurables a menos que sean expresadas en unidades monetarias: por ejemplo, para comparar volúmenes de excavación, horas de trabajo del personal, cantidades de tubería de distintos materiales, bombas; válvulas y plantas de tratamiento la única unidad de medición que se puede utilizar es la unidad monetaria.

A.2 Comparación de Costos

En la selección de sistemas de abastecimiento de agua es necesario demostrar que el sistema que se escoge alcanza la meta deseada al mínimo costo total.

El costo total incluye el costo inicial, y a los costos recurrentes por operación y mantenimiento. Es necesario sumar estos costos para determinar cuál sistema tiene el menor valor presente, costo anual, o costo unitario.

Los costos anuales, como pueden ser los gastos por operación, se convierten al tiempo presente multiplicando por el factor de valor presente (P/A). Este factor indica el número de pesos que inicialmente se deben invertir, a la tasa de interés i , para retirar un peso al final de cada año, hasta el año N . La siguiente expresión representa al factor de valor presente:

$$\left(\frac{P}{A}, i, N\right) = \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \quad (24)$$

El costo inicial puede convertirse a costos anuales multiplicando por el factor de recuperación de capital. Este factor indica el número de pesos que se pueden retirar en cantidades iguales al final de cada año hasta el año N si un peso es inicialmente depositado al i por ciento de interés. El factor de recuperación de capital se expresa:

$$\left(\frac{A}{P}, i, N\right) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (25)$$

En la tabla 3 aparecen tabulados valores de los factores de interés, antes mencionados, para algunos años (N) y selectas tasas de interés (i).

FACTORES DE INTERES COMPUESTO (N=NUMERO DE AÑOS)

N	F/P, 3.5000%, N	P/F, 3.5000%, N	A/F, 3.5000%, N	F/P, 3.5000%, N	F/A, 3.5000%, N	P/A, 3.5000%, N
1	1.0350	0.966134	1.000000	1.035000	1.0000	0.9661
2	1.0712	0.893251	0.970147	0.529400	2.0350	1.9907
4	1.1475	0.811442	0.832251	0.272251	4.2149	3.9331
6	1.2293	0.713591	0.652654	0.187668	6.5507	5.9245
8	1.3169	0.609412	0.480477	0.145477	9.0517	8.4740
10	1.4106	0.509919	0.041241	0.120241	11.7314	10.9144
12	1.5111	0.415183	0.018494	0.101494	14.6020	13.5523
15	1.7759	0.594931	0.011475	0.084825	19.7957	18.4176
20	1.4498	0.532565	0.035351	0.070251	25.2797	24.2124
25	2.3637	0.423147	0.024574	0.060574	35.9499	34.4415
30	3.4059	0.354274	0.019171	0.054371	51.4327	49.3620
35	3.3334	0.299977	0.014094	0.049994	66.6740	64.0007
40	3.5593	0.252573	0.011477	0.046327	84.5503	81.3551
45	4.7724	0.212459	0.009653	0.044453	105.7817	102.4004
50	5.5649	0.179043	0.007624	0.042434	130.9979	127.4454
60	7.8791	0.126334	0.005049	0.040049	196.4166	193.9467
70	11.1128	0.089936	0.003451	0.038651	255.9378	253.0004
80	15.6757	0.061791	0.002359	0.037359	319.2067	316.2454
90	22.1122	0.045224	0.001658	0.036654	403.2049	399.2704
100	31.1914	0.032060	0.001159	0.036159	522.6114	517.7544
INF	INF	0.0	0.0	0.035000	INF	28.5714

N	F/P, 4.0000%, N	P/F, 4.0000%, N	A/F, 4.0000%, N	F/P, 4.0000%, N	F/A, 4.0000%, N	P/A, 4.0000%, N
1	1.0400	0.961539	1.000000	1.040000	1.0000	0.9615
2	1.0816	0.824556	0.880194	0.530196	2.0400	1.8861
4	1.1690	0.654904	0.715450	0.275490	4.2465	3.6799
6	1.2559	0.492315	0.450752	0.190762	6.6330	5.2421
8	1.3646	0.370497	0.243528	0.148528	9.2142	7.7327
10	1.4802	0.275564	0.043391	0.123391	12.0011	10.1109
12	1.6010	0.204597	0.024552	0.106552	15.0255	13.3651
15	1.8229	0.555255	0.043941	0.089941	20.0236	18.1184
20	2.1911	0.456397	0.033582	0.073582	29.7781	27.5423
25	2.5559	0.375117	0.024012	0.064012	41.6459	39.6201
30	3.2634	0.304319	0.017870	0.057270	56.0340	53.2500
35	3.9461	0.253415	0.014577	0.053577	73.6522	70.6645
40	4.8010	0.209249	0.010323	0.050523	95.0255	91.7912
45	5.9412	0.171199	0.008242	0.048242	121.0294	116.7200
50	7.1047	0.140713	0.006550	0.046550	152.6671	147.4800
60	10.5194	0.095360	0.004272	0.044202	237.9907	227.6235
70	15.5716	0.064219	0.002745	0.042745	354.2464	337.3945
80	21.0499	0.043384	0.001814	0.041214	511.2449	489.9154
90	28.1193	0.029139	0.001209	0.041209	727.9833	704.2473
100	38.5049	0.019800	0.000808	0.040808	1037.6236	1004.5050
INF	INF	0.0	0.0	0.040000	INF	25.0000

N	F/P, 4.5000%, N	P/F, 4.5000%, N	A/F, 4.5000%, N	F/P, 4.5000%, N	F/A, 4.5000%, N	P/A, 4.5000%, N
1	1.0450	0.956938	1.000000	1.045000	1.0000	0.9569
2	1.0920	0.812710	0.889999	0.532999	2.0450	1.8727
4	1.1925	0.638561	0.733744	0.279744	4.2787	3.5975
6	1.3027	0.476726	0.449679	0.193478	6.7166	5.1575
8	1.4271	0.352315	0.256510	0.151410	9.3900	7.5459
10	1.5535	0.263928	0.041379	0.126379	12.2782	10.1037
12	1.6959	0.199864	0.024456	0.109866	15.4640	13.1156
15	1.9353	0.516730	0.044114	0.093114	20.7841	19.2455
20	2.4117	0.414943	0.031374	0.074474	31.3714	29.0279
25	3.0954	0.332731	0.022439	0.067439	44.9452	42.3280
30	3.7249	0.267700	0.016152	0.061392	61.0371	57.7890
35	4.6674	0.214244	0.012270	0.057270	81.4986	77.4400
40	5.9144	0.171039	0.009243	0.054043	107.6303	103.4016
45	7.2447	0.137314	0.007270	0.052202	139.4100	134.1563
50	9.0324	0.110710	0.005402	0.050702	185.5030	179.7620
60	14.0725	0.071249	0.003454	0.048454	289.4979	282.3350
70	21.7743	0.045405	0.002145	0.047165	401.2696	391.2021
80	33.8301	0.029149	0.001371	0.0464371	529.4576	514.4653
90	47.5307	0.019016	0.000874	0.045871	729.2449	714.2940
100	67.5444	0.012257	0.000559	0.045459	1000.4557	984.9401
INF	INF	0.0	0.0	0.045000	INF	22.2227

N	F/P, 5.0001,4	P/F, 5.0001,4	A/F, 5.0001,4	A/P, 5.0001,4	F/A, 5.0001,4	P/A, 5.0001,4
1	1.0570	0.352341	1.000000	1.050000	1.0000	0.4536
2	1.1725	0.507000	0.447396	0.531905	2.0000	1.4534
4	1.2155	0.802732	0.270512	0.747032	4.3101	3.5460
6	1.3471	0.364735	0.167217	0.197217	6.8019	5.0757
8	1.4775	0.075439	0.104232	0.154727	9.5401	6.4532
10	1.6189	0.413913	0.075025	0.125505	12.5734	7.7011
12	1.7659	0.154937	0.050425	0.112325	15.9171	8.8653
14	2.0789	0.481017	0.046342	0.098342	21.5786	10.3767
20	2.4533	0.376890	0.033243	0.090243	33.0640	12.4422
25	3.2464	0.294323	0.029962	0.075952	47.7271	14.0439
30	4.1719	0.231377	0.015051	0.065051	66.4358	15.3775
35	5.5160	0.181290	0.011072	0.051072	90.3203	16.3742
40	7.0470	0.147046	0.007276	0.039276	120.7998	17.1591
45	8.9350	0.111247	0.005242	0.028242	159.7001	17.7741
50	11.4674	0.083704	0.004777	0.024777	209.1430	18.2559
60	14.8752	0.053535	0.003739	0.018239	283.5433	18.9265
70	20.4244	0.032844	0.002149	0.009149	385.5284	19.3427
80	27.5414	0.020177	0.001080	0.005080	521.2287	19.5465
90	36.7303	0.012387	0.000627	0.003527	704.6070	19.7023
100	48.5012	0.007664	0.000343	0.002043	941.0246	19.8474
1NF	1NF	0.0	0.0	0.050000	1NF	20.0000

N	F/P, 5.5001,4	P/F, 5.5001,4	A/F, 5.5001,4	A/P, 5.5001,4	F/A, 5.5001,4	P/A, 5.5001,4
1	1.0550	0.367847	1.000000	1.050000	1.0000	0.4473
2	1.1130	0.699452	0.446519	0.541618	2.0000	1.4467
4	1.2348	0.807217	0.212734	0.244294	4.3423	3.5007
6	1.3789	0.325246	0.145179	0.201179	6.8981	4.9965
8	1.4947	0.651509	0.102364	0.157364	9.7216	6.3746
10	1.7091	0.565431	0.077648	0.132688	12.8754	7.5336
12	1.9012	0.525092	0.061029	0.116029	16.3354	8.5185
14	2.2375	0.447913	0.044526	0.099626	22.4037	10.0237
20	2.8179	0.342729	0.029879	0.073579	34.8683	11.9504
25	3.4134	0.262234	0.019849	0.074549	51.1525	13.4141
30	4.4984	0.270544	0.013934	0.064905	72.4355	14.5327
35	6.1139	0.157537	0.009975	0.044975	100.2314	15.3426
40	8.5133	0.117443	0.007320	0.032320	138.4055	16.0461
45	11.1266	0.078975	0.005431	0.020431	194.1152	16.5477
50	14.5430	0.049767	0.004061	0.015061	266.2175	16.9314
60	24.8343	0.030259	0.002707	0.009707	433.4504	17.2490
70	42.4209	0.017354	0.001512	0.005322	633.2712	17.5111
80	72.4764	0.009709	0.000763	0.003569	929.5714	17.7410
90	121.8717	0.005078	0.000449	0.002449	1352.7319	18.0000
100	211.4696	0.002729	0.000261	0.001561	1946.7074	18.2000
1NF	1NF	0.0	0.0	0.050000	1NF	18.0000

N	F/P, 6.0001,4	P/F, 6.0001,4	A/F, 6.0001,4	A/P, 6.0001,4	F/A, 6.0001,4	P/A, 6.0001,4
1	1.0650	0.343394	1.000000	1.050000	1.0000	0.4430
2	1.1236	0.349396	0.495437	0.545437	2.0000	1.4336
4	1.2625	0.792094	0.228521	0.288521	4.3746	3.4451
6	1.4185	0.304951	0.143161	0.203161	6.9753	4.9102
8	1.5338	0.627417	0.101036	0.161036	9.8975	6.2258
10	1.7909	0.556395	0.075459	0.135968	13.1908	7.2601
12	2.0127	0.494969	0.059277	0.119277	16.8699	8.3232
14	2.3065	0.417265	0.042963	0.102963	23.2760	9.3120
20	3.2071	0.311905	0.027165	0.087165	36.7856	11.4599
25	4.2919	0.232039	0.018227	0.076227	54.8645	12.7314
30	5.7435	0.174210	0.012649	0.072649	79.0582	13.7608
35	7.6961	0.130105	0.008474	0.059974	111.4348	14.4920
40	10.2957	0.097222	0.006462	0.050462	154.7520	15.0463
45	13.7646	0.072690	0.004700	0.004700	212.7435	15.4558
50	18.4732	0.054298	0.003444	0.003444	290.3359	15.7616
60	32.9877	0.030714	0.001876	0.001876	533.1282	16.1614
70	59.0759	0.016927	0.001033	0.001033	807.9321	16.3845
80	104.3940	0.009452	0.000573	0.000573	1146.5991	16.5000
90	189.4645	0.005278	0.000313	0.000313	1641.0749	16.5787
100	339.3020	0.002947	0.000177	0.000177	2338.3673	16.6111
1NF	1NF	0.0	0.0	0.060000	1NF	16.6667

N	F/P, 7.0001,4	P/F, 7.0001,4	A/F, 7.0001,4	A/P, 7.0001,4	F/A, 7.0001,4	P/A, 7.0001,4
1	1.0700	0.335579	1.000000	1.070000	1.0000	0.4341
2	1.1449	0.473439	0.483092	0.457092	2.0000	1.4240
4	1.3109	0.762995	0.225228	0.295228	4.4399	3.3870
6	1.4507	0.656362	0.139774	0.209774	7.1533	4.7865
8	1.7182	0.667005	0.097449	0.167449	10.2598	5.9713
10	1.9672	0.556349	0.072174	0.142174	13.8164	7.0215
12	2.3052	0.444012	0.055922	0.125922	17.8985	7.9427
14	2.7400	0.352446	0.040745	0.109745	25.1290	8.8104
20	3.8097	0.258419	0.024333	0.084333	40.9955	10.4940
25	5.4274	0.154747	0.015911	0.075911	63.2440	11.0536
30	7.8103	0.101197	0.010446	0.060446	94.4409	12.4000
35	10.8765	0.073667	0.007214	0.057214	138.2359	12.9477
40	14.8745	0.054680	0.005079	0.045079	194.6151	13.3317
45	21.0024	0.040784	0.003500	0.033500	285.7492	13.4055
50	28.4450	0.030446	0.002440	0.024440	406.5294	13.4507
60	52.0344	0.017373	0.001299	0.012277	619.4201	14.0702
70	113.0033	0.008777	0.000620	0.006050	881.4137	14.0704
80	274.2343	0.004440	0.000314	0.003014	1193.0613	14.2700
90	441.1027	0.002247	0.000169	0.001619	1674.1423	14.2700
100	882.2142	0.001150	0.000081	0.000081	2341.6449	14.2700
1NF	1NF	0.0	0.0	0.070000	1NF	14.2707

N	FZF, 9.0007, N	PZF, 9.0007, N	AZF, 9.0007, N	MZF, 9.0007, N	FZA, 9.0007, N	PZA, 9.0007, N
1	1.0000	0.999999	1.000000	1.000000	1.00000	0.99999
2	1.1474	0.987799	0.987799	0.987799	2.29480	1.70519
4	1.3065	0.971910	0.971910	0.971910	4.58961	3.41038
6	1.5000	0.950000	0.950000	0.950000	7.13150	5.00000
8	1.8570	0.922660	0.922660	0.922660	10.00000	7.00000
10	2.1988	0.890000	0.890000	0.890000	14.00000	9.00000
12	2.5182	0.852655	0.852655	0.852655	18.00000	11.00000
15	3.1722	0.785742	0.785742	0.785742	27.1521	16.8478
20	4.5610	0.714148	0.714148	0.714148	45.7220	29.2779
25	6.4691	0.646019	0.646019	0.646019	73.1059	44.8940
30	10.0527	0.590777	0.590777	0.590777	113.2932	68.7067
35	14.7863	0.545803	0.545803	0.545803	172.7157	102.2841
40	21.7245	0.506031	0.506031	0.506031	259.0554	147.9445
45	31.0274	0.471329	0.471329	0.471329	376.0054	215.9971
50	44.0014	0.440000	0.440000	0.440000	537.7629	302.2370
60	73.2570	0.400000	0.400000	0.400000	851.2124	458.7875
70	114.4042	0.364574	0.364574	0.364574	1270.0777	688.1929
80	171.0543	0.332119	0.332119	0.332119	1874.9204	1000.0000
90	2514.9137	0.302991	0.302991	0.302991	2723.9235	1414.0771
100	3799.2579	0.276455	0.276455	0.276455	3743.4789	1955.5441
150	150	0.0	0.0	0.0	150	12.5000

N	FZF, 10.0007, N	PZF, 10.0007, N	AZF, 10.0007, N	MZF, 10.0007, N	FZA, 10.0007, N	PZA, 10.0007, N
1	1.1000	0.990000	1.000000	1.000000	1.00000	0.90000
2	1.2100	0.924444	0.875000	0.875000	2.10000	1.70000
4	1.4641	0.857914	0.815471	0.815471	4.6410	3.1550
6	1.7716	0.804474	0.789607	0.789607	7.7156	4.2517
8	2.1436	0.766909	0.787444	0.787444	11.6059	5.3349
10	2.5937	0.745543	0.802745	0.802745	15.9774	6.2440
12	3.1394	0.731863	0.806763	0.806763	21.3843	6.8127
15	4.1772	0.729392	0.811474	0.811474	31.7725	7.4041
20	6.2775	0.748544	0.817450	0.817450	57.2750	9.5034
25	10.8347	0.807276	0.810159	0.810159	96.7470	14.0770
30	17.4694	0.857309	0.806079	0.806079	164.4919	24.2249
35	28.1024	0.905584	0.800740	0.800740	271.0241	39.6442
40	45.2592	0.977055	0.802259	0.802259	442.5921	61.7501
45	72.8974	0.017719	0.801391	0.801391	718.6040	91.8624
50	117.2907	0.009519	0.800659	0.800659	1163.9070	134.9148
60	204.4910	0.003284	0.800330	0.800330	1834.8115	209.9672
70	389.7457	0.001266	0.800127	0.800127	2837.4544	319.9573
80	769.3949	0.000488	0.800049	0.800049	4267.9562	480.9571
90	1513.9071	0.000198	0.800019	0.800019	6423.0147	700.9571
100	3027.8142	0.000078	0.800007	0.800007	9637.5724	1000.9571
150	150	0.0	0.0	0.0	150	10.0000

N	FZF, 12.0007, N	PZF, 12.0007, N	AZF, 12.0007, N	MZF, 12.0007, N	FZA, 12.0007, N	PZA, 12.0007, N
1	1.1200	0.992857	1.000000	1.000000	1.00000	0.90000
2	1.2544	0.979194	0.971698	0.971698	2.12000	1.60000
4	1.5735	0.935518	0.929234	0.929234	4.7793	3.2327
6	1.9738	0.906671	0.913226	0.913226	8.1152	4.1114
8	2.4760	0.883883	0.913003	0.913003	12.2997	5.2574
10	3.1058	0.871973	0.906584	0.906584	17.5487	6.6500
12	3.8940	0.866675	0.904137	0.904137	24.1331	8.1844
15	5.4735	0.872694	0.902824	0.902824	37.2797	11.3109
20	9.6453	0.877667	0.901779	0.901779	72.0524	21.4544
25	17.0000	0.884922	0.900750	0.900750	133.7338	37.4431
30	29.9599	0.893770	0.900444	0.900444	241.1324	60.0552
35	52.7994	0.901890	0.900217	0.900217	431.6429	91.1755
40	93.0508	0.908747	0.9001304	0.9001304	767.0003	132.335
45	161.9872	0.915094	0.9000736	0.9000736	1358.2775	200.2895
50	289.0015	0.9207460	0.9000417	0.9000417	2400.9134	290.7045
60	507.5947	0.925114	0.9000134	0.9000134	4211.5226	412.741
70	887.7973	0.929090	0.9000043	0.9000043	7323.2629	573.003
80	1549.4402	0.9328115	0.9000014	0.9000014	12745.4429	803.224
90	2689.1817	0.9363037	0.9000004	0.9000004	22490.2334	1100.330
100	4342.1854	0.9396032	0.9000001	0.9000001	39600.7450	1500.330
150	150	0.0	0.0	0.0	150	8.3333

N	FZF, 15.0007, N	PZF, 15.0007, N	AZF, 15.0007, N	MZF, 15.0007, N	FZA, 15.0007, N	PZA, 15.0007, N
1	1.1500	0.995000	1.000000	1.000000	1.00000	0.90000
2	1.3225	0.984144	0.965114	0.965114	2.15000	1.60000
4	1.7497	0.967757	0.950245	0.950245	4.9934	3.4437
6	2.3131	0.955328	0.942237	0.942237	8.7537	5.2664
8	3.0570	0.946922	0.937280	0.937280	13.7268	7.4073
10	4.0655	0.941185	0.934053	0.934053	20.3037	10.0000
12	5.3577	0.937697	0.932441	0.932441	29.0017	13.0000
15	7.1371	0.935795	0.931817	0.931817	41.5804	18.0000
20	12.2655	0.934100	0.931761	0.931761	70.4426	27.0000
25	17.0189	0.933378	0.931690	0.931690	100.7479	38.0000
30	22.5117	0.933109	0.931630	0.931630	144.7443	51.0000
35	30.0175	0.933129	0.931585	0.931585	204.1197	67.0000
40	39.8611	0.933144	0.931550	0.931550	282.0431	86.0000
45	52.4648	0.933149	0.931524	0.931524	382.1757	109.0000
50	68.2643	0.933149	0.931503	0.931503	518.2729	140.0000
60	99.9193	0.933149	0.931484	0.931484	704.2729	183.0000
70	137.9443	0.933149	0.931469	0.931469	954.2729	239.0000
80	184.9171	0.933149	0.931457	0.931457	1294.2729	310.0000
90	244.9171	0.933149	0.931448	0.931448	1744.2729	390.0000
100	321.9171	0.933149	0.931441	0.931441	2334.2729	480.0000
150	150	0.0	0.0	0.0	150	8.3333

B. Financiamiento del Proyecto

Hasta este punto se ha hablado del criterio económico para la selección del mejor proyecto. A continuación se discutirá acerca del análisis financiero, el cual sirve para la obtención de fondos para la construcción del proyecto seleccionado.

Es importante hacer la diferencia entre análisis económico y análisis financiero. Un análisis económico ayuda a responder a las siguientes preguntas:

- ¿Se debe construir el proyecto?
- ¿Se debe construir de esta forma?
- ¿Se debe construir ahora?

Por otro lado, el análisis financiero, que viene generalmente después del económico, pretende responder a las preguntas:

- ¿Quién debe pagar por los costos del proyecto?
- ¿El que deba pagar por el proyecto podrá reembolsar o amortizar las obligaciones de pago?

Los datos de un análisis económico son útiles en el análisis financiero pues sirven para ayudar a evaluar planes de financiamiento. Los fondos para la construcción de los sistemas de abastecimiento de agua se adquieren normalmente a préstamo. Los préstamos, por lo general, estipulan cómo se obtendrán los fondos para su amortización, así como para hacer frente a otras obli

gaciones permanentes del sistema. Son ejemplo de esto los pagos de intereses y los costos de operación y mantenimiento.

BIBLIOGRAFIA:

1. "Abastecimiento de Agua y Remoción de Aguas Residuales"
Volumen 1, Fair G.M., Geyer J.C., Okun D.A.; Editorial
Limusa, 1974.
2. "Ingeniería Sanitaria"
Ing. Ernesto Murguía V., 1974.
3. "Bombas para Agua Potable"
Barnes G.E., Paz Sánchez A., Viejo Zubizaray M., Amezcua García, J.,
Sotelo Avila G.; DESFI-UNAM; 1966.
4. "Plumbers and Pipe Fitters Library"
Volumen III, Mc Connell C.; T. Audel and Co.; 1977.
5. "Economics of Water Resources Planning"
James L.D., Lee R.R.; Mc Graw Hill, 1971.
6. "Water Problems of Urbanizing Areas"
Whipple W. Jr., Grigg N., Lanyon R.; New England College,
Henniker, N.H.; ASCE, 1978.
7. "Water Resources Engineering"
Linsley R.K., Franzini J.B.
Mc Graw Hill, 1979.
8. "Water Supply and Sewerage"
Steel E.W., Mc Ghee T.J., Mc Graw Hill, 1979.



"EXPLORACION Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA"

Directorio de Asistentes

ING. BENIGNO ALVAREZ CORTES

Jefe del Depto. de Proyectos

Comisión del Papaloapan

SARH

Campamento Cd. Gral. Miguel Alemán, Ver.

Domicilio conocido

Cd. Alemán, Ver.

DAVID ARANDA BARRERA

estudiante

Facultad de Ingeniería,

UNAM

Comdte. Blanquel 32 A

Col. Observatorio

México 18, D. F.

Tel: 516-55-69

JUAN MANUEL CARRIZALEZ HERNANDEZ

Proyectista

SARH

Plaza de la República 31 6º piso

Col. Tabacalera México 1, D. F.

Antonio Caso 34-13

Col. San Rafael

México 4, D. F.

Tel: 592-51-67

ING. JESUS MIGUEL CERVANTES RODRIGUEZ

Proyectista (Hidrólogo)

C.P.N.H. SARH

Amealco # 8 1er piso

Col. Roma México 8, D. F.

Tel: 574-49-43

Real de los Reyes # 87 D-303

Col. Coyoacán

México 21, D.F.

Tel: 544-90-96

ING. ALFREDO FAUD DAVID GIDI

Jefe de Proyecto

Dirección de Protección y Ordenación

Ecológica SARH

Reforma 107 4ºPiso

Col. San Rafael México 4, D. F.

Tel: 546-18-47

Calle 30 A # 27

Col. Sta. Rosa de Lima

México 14, D. F.

ING. JOSE LUIS ESPINOZA PUPPO
Aux. de la Residencia de Programas
y Estudios Específicos SARH
Carranza # 69
Col. Rev. Mexicana
Constitución, B.C.S.
Tel: 2-11-01

ING. ALFREDO FLORES JUAREZ
Especialista
C.P.N.H. SARH
Tepic #40 y Torreón # 21
Col. Roma México 7, D. F.
Tel: 564-51-07

Hidalgo # 26
Col. San Fco. Culhuacan
México 13, D. F.

ING. JOSE GARCIA LEDESMA
Dirección de Estudios y Evaluación
Depto. de Hidrología
Comisión de Aguas del Valle de México
Col. Centro México 1, D. F.
Tel: 521-87-25 al 32 Ext. 128

Rancho del Arco 95 Cerrada 4 Lte. 4
Fracc. Los Girasoles
México 22, D. F.

ING. JUAN JOSE GALVAN VAZQUEZ
Proyectista
SARH
Plaza de la República 75 6º Piso
Col. Tabacalera México 1, D. F.
Tel: 546-52-75

Antonio Caso 34-13
Col. San Rafael
México 4, D. F.
Tel: 592-51-67

SILVESTRE GUTIERREZ MENDOZA
Jefe de Sección (Pasante de Ing. Geologo)
Dir. General del Territorio Nacional
San Antonio Abad No. 124
Col. Tránsito México 8, D. F.
Tel: 578-10-75

Vallarta # 81
Col. Coyoacán
México 21, D. F.
Tel: 554-44-91

ESPERANZA GLORIA HERNANDEZ GUTIERREZ

Hidrólogo

DEGETENAL

San Antonio Abad # 124

Tel: 578-62-00 ext. 127

Londres 62-4

Col. Juárez

México 6, D. F.

Tel: 525-26-27

JOSE DE JESUS LOPEZ FLORES

Jefe de Proyecto

CPNH SARH

Tepic 50

Col. Roma México 7, D. F.

Tel: 584-72-74

AR KELAO LOPEZ PEREZ

Pasante de Ing. Hidrólogo

CPNH SARH

Amealco # 8

Col. Roma México 8, D. F.

Tel: 574-49-43

Unión Postal # 166

Col. Postal

México 13, D. F.

Tel: 579-86-05

JUAN ALVARO LOZA HIDALGO

Gerente General

Estudios Físicos de la Tierra S. A.

Magdalena 37 - 101

Col. del Valle México 12, D. F.

Tel: 543-94-69

Morelos 34 - 1

Col. Toriello

México 7, D. F.

Tel: 573-99-43

TEODOLFO MARTINEZ TOLEDANO

Calculista

CIEPS

Córdoba 127

Col. Roma

Tel: 574-74-41

Lerdo 284 - C - 54

Edif. Juárez Tlatelolco

México 3, D. F.

Tel: 597-06-13

ING. JOSE LUIS MARTINEZ MEDINA

Jefe de Oficina

SARH

Plaza de la República 31 - 8º piso

Col. Tabacalera México 1, D. F.

Tel: 546-06-55

Valladolid 22 - 1

Col. Roma México 7, D. F.

Tel: 525-55-55

JUAN MANUEL MEDINA RODRIGUEZ

Estudiante

UNAM

Universidad 1953

Edif. 8 - 102

Col. Copilco México 20 D. F.

ING. ALFONSO NARES ECHAVARRIA

Jefe del Depto. de Perforación de Pozos

Abasolo y Zacatecas

Tepic, Nayarit.

Tel: 2-24-20

Tuxpan 51

Col. Morelos

Tepic, Nayarit

ING. RODOLFO RAFAEL NAVA VILLALPANDO

Jefe "J" de Servicios Federales

SARH

San Antonio Abad 32 - 13º piso

Col. Tránsito México 8, D. F.

Tel: 542-91-17

Valle Tranquilo No. 16

Tultitlán Edo. de Méx.

Izcalli del Valle

CARLOS PEREZ GONZALEZ

Subjefe de Oficina

SARH

Dr. Atl No. 4

Co., Sta. María la Ribera ZP. 4

Tel: 566-24-90

Charco Azul 8 - 8

Col. Mixcoac

México 19, D. F.

Tel: 598-31-60

ING. VICTOR ALFREDO PEREZ MANZARRON

Geólogo

CONAZA SARH

Tonalá No. 30 México 7, D. F.

Tel: 525-93-60 Ext. 36

Mza. 3 Lte. E Casa 13

Ayotla Edo. de México

Tel: 4-00-81

JOAQUIN PEREZ SANABRIA

Oficial Administrativo A
Comisión de Aguas del Valle de México
Balderas No. 55

Sur 119 - 826
Col. Escuadrón 201
México 13, D. F.

ING. ANDRES REGALADO RUIZ

Gerente
Bufete Geológico y Construcciones
Blvd. López Mateos y Chimalpopoca
León, Guanajuato
Tel: 378-90

Comonfort 807
León Guanajuato
Tel: 227-02

ANDRES REYES GONZALEZ

Auxiliar Técnico
SARH
Paseo de la Reforma 69
Col. San rafael México 4, D. F.
Tel: 546-06-55

Cuauhtémoc 45
Col. San Javier
Tlalnepantla Edo. de Méx.

HERIBERTO REYES VAZQUEZ

Pasante de Ingeniería
INRA S.A.
José Má. Ríco 538
Col. del Valle

Sericultura 192
Col. 20 de Noviembre
México 2, D. F.
Tel: 789-65-78

ALFONSO RODRIGUEZ FERREIRA

Analista Hidráulico
Dr. Noriega y Ramírez 81
Hermosillo, Son.
Tel: 2-49-37

Oaxaca 86 Pte.
Hermosillo, Sonora
Tel: 3-82-90

ING. L. JORGE ROLDAN OSEGUERA

Geólogo
CIEPS, S. C.
Córdoba 127
Col. Roma México 7, D. F.
Tel: 584-16-99

Manz. 4 Gpo. 13 Casa 15
Unidad Sta. Fe México 18, D. F.
Tel: 515-26-88

GERARDO ROMERO CORREA

Jefe de Oficina de Control de Vedas
SARH
 Plaza de la República # 31 8° Piso
 Col. Tabacalera México 1, D. F.
 Tel: 546-49-09

Salaverry # 1075 - 1
 Col. Lindavista
 México 14 D. F.
 Tel: 546-49-09

ING. JOSE LUIS ROSAS LOPEZ

Gerente de Proyecto
 Estudios Físicos de la Tierra, S. A-
 Magdalena 37-101
 Col. del Valle México 12, D. F.
 Tel: 543-94-69

Cefeo 153
 Col. Prado Churubusco
 México 13, D. F.
 Tel: 582-09-09

ING. CARLOS JOSE SALCIDO SOLERSI

Popocatepetl 295-9
 Col. General Anaya
 México 13, D. F.

ALEJANDRO SANCHEZ BEDOLLA

Registrador Electrónico
 Cerrada Cruz Verde N. 8
 Col. Coyoacán
 México 21, D. F.
 Tel: 544-13-56

Cerro del Quetzal 320
 Col. Campestre Churubusco
 México 21, D. F.
 Tel: 544-35-11

RAMIRO SANDOVAL CORREA

Jefe de la Of. de Reg. Nacional de Pozos
 Aprov. Hidráulicos (Aguas del Subsuelo)
 Plaza de la República No. 31 - 8°
 Col. Tabacalera México 1, D. F.
 Tel: 566-96-94 ..95

Sucre 92 - A
 Col. Moderna
 México 13, D. F.

ING. JUAN RAMON TORRES HERNANDEZ

Proyectista
 Dirección General de Obras Hidraulicas
 Reforma 64 México 1, D. F.
 Tel: 546-40-92

Reforma Nte. 630-903
 U. Tlatelolco México 3, D. F.
 Tel: 529-90-80

CARLOS SANDOVAL RODRIGUEZ

Proyectista

SARH

Av. Reforma Centro 20 4° Piso

México 1, D. F.

Tel: 546-40-92

Av. Reforma Nte. 630/903

U. Tlatelolco

México 3, D. F.

529-90-80

ING. ALFONSO VELASCO MENDOZA

Auxiliar Técnico

SARH

Reforma 51 10°Piso

México 1, D. F.

Tel: 546-73-61

Chosica 594

Col. Lindavista

México 14, D. F.

Tel: 586-01-45

ALFREDO MENDEZ FERRAT

Programas y Estudios Específicos

SARH

Dr. Noriega y Ramirez No. 81

Hermosillo, Son.

Tel: 2-49-37

Calle 4a. No. 72 Este

H. Caborca, Sonora

Tel: 2-20-59

FROYLAN APARICIO RODRIGUEZ

Comisión del Lago de Texcoco

José Loreto Fabela 850

S. J. de Aragón

México 14, D. F.

Tel: 794-11-00

Pto. Tampico 156-1

Col. Casas Aleman

México 14, D. F.

