

Directorio de Profesores del Curso Perforación de Pozos
Para Agua 1980.

1. Ing. Robisel Chiñas Laló
Director General
Perforaciones y Estudios Geológicos, S.A.
Tajín 147
México 12, D.F.
519 23 26
2. Ing. José Luis Sánchez Lazcano (Coordinador)
Director General
Tubería y Estructuras, S.A.
Culiacán No. 123-707
México 11, D.F.
584 35 22
3. Ing. Ariel Erosa Mendoza
Gerente de Ventas
Cía. KSB Mexicana, S.A.
Dinamarca 60-302
México 6, D.F.
535 01 55
4. Ing. Andrés Bentón Cuellar
Jefe de Superintendentes
ICA
Minería 145 Edif. B Entrada i-3° Piso
Col. Escandón
México 18, D.F.
516 04 60 Ext. 166
5. Ing. José Maldonado Rosas
Subjefe del Departamento de Perforación
de Aforos y Electromecánica
Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas
S A R H
Dr. Atl No. 6-2° Piso
México 4, D.F.
566 89 92
6. Ing. Juan Silva Zamudio
Jefe de la Oficina de Operación de Equipos
de Perforación por Administración
Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas
Departamento de Perforación de Aforos y Electromecánica
S A R H
Dr. Atl No. 6-2° Piso
México 4, D.F.
566 89 92



7. Ing. José San Vicente Ruy
Gerente de Producción
Promotora Agrícola Industrial, S.A.
Calzada de la Viga No. 1150
Col. Apatlaco
México 8, D.F.
590 01 11

8. Ing. Juan José Rocha Rangel
Gerente General
Rocha y Asociados, S.A.
Retorno Miguel Lanz Duret No. 42
Col. Periodistas
México 10, D.F.
557 30 85

9. Ing. Rafael Alvaro Jiménez Granados
Asesor Técnico
Subdirección de Construcción de Obras Hidráulicas
e Ingeniería Agrícola para el Desarrollo Rural
S A R H
P. de la Reforma No. 69-7° Piso
México, D.F.
535 29 97

10. Ing. Luis Lara Trujillo
Superintendente General de Nuevas Técnicas
Gerencia de Exploración
Subdirección de Exploración
PEMEX
Marina Nacional No. 329-6° Piso Edif. 1810
México 17, D.F.
531 63 08

11. Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Lesser y Asociados
Avenida Cuauhtémoc No. 799 Despacho 6
Col. Narvarte
Z.P. 12
5 94 34 66

12. Dr. Tyler Jass
National Water Well Association
500 West Wilson Brige Road
Worthington, Ohio
U S A

13. Ing. José Antonio Trujillo Candelarfa
Jefe del Departamento de Exploración
Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas
S A R H
Abraham González No. 3 Entrepiso
México 1, D.F.
535 08 17

14. Ing. Rafael Martínez García
Coordinador de Fluidos de Perforación
Superintendencia general de Operación Marina
Gerencia de Perforación
PEMEX
Tonalá No. 6-1º Piso
México 7, D.F.
533 50 33

15. Ing. Rubén Martínez Guerra
Presidente
Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados
Atlixco No. 63 P B
Col. Condesa
México 11, D.F.
553 53 47

16. Ing. José María Bolívar del Valle
Calle de San Juan de Dios Nos. 134 y 136
Col. Huipulco
México 22, D.F.
5 73 67 30

17. Ing. Jorge Alvarado Ortuño



PLRFORACION DE POZOS PARA AGUA 1980.

FECHA	DURACION	T E M A	PROFESORES
OCT. 20		LOCALIZACION	
	9:00 a 12:30 P.M.	Geología y Geohidrología Formaciones Acuíferas Aluviones Basaltos Calizas Otros Prospección Geohidrológica Fotointerpretación	Ing. Jorge A. Trujillo Candelaria
	12:30 a 14:00	Geofísica	Ing. Robisel Chiñas Laló
	14:00 a 15:00	COMIDA	
	15:00 a 16:30	Registros Eléctricos	Ing. Luis Lara Trujillo
	16:30 a 18:00	Trazadores	Ing. Juan Manuel Lesser Illades
OCT. 21		TECNICAS DE PERFORACION	
	9:00 a 10:00 A.M.	Perforabilidad de las rocas	Ing. José Luis Sánchez Lazcano
	10:00 a 11:00	Percusión simple Pescas	Ing. Rafael Jiménez Granados
	11:00 a 13:00 P.M.	Sistema rotativo Circulación directa Pescas	Ing. Andrés Bénton Cuéllar
	13:00 a 14:00	Lodos de perforación	Ing. Rafael Martínez García
	14:00 a 15:00	COMIDA	



FECHA	DURACION	T E M A	PROFESORES
OCT. 21	15:00 a 17:00 P.M.	Perforación neumática Perforación con martillos Aire Aire y espumantes	Ing. Andrés Bentón Cuéllar
	17:00 a 18:00	Circulación inversa	Ing. Andrés Bentón Cuéllar
OCT. 22		EVALUACION	Ing. Rubén Martínez Guerra
	9:00 a 11:30 A.M.	Pruebas de bombeo Transmisibilidad Almacenamiento Cuantificación Explotación	
	11:30 a 14:00 P.M.	Explotación Interface e intrusión salina Geoquímica	Ing. Juan Manuel Lesser illades
	14:00 a 15:00	COMIDA	
	15:00 a 18:00	CONTROL Y OPERACION DE LOS APROVECHAMIENTOS Sistemas de control Formas de control Banco Nacional de Información Geohidrología	Ing. Jorge Alvarado Ortuño

FECHA

DURACION

T E M A

PROFESORES

OCT. 23

9:00 a 13:00 P.M.

DISEÑO Y SELECCION DE EQUIPOS DE BOMBEO

Tipos de bombas
 Centrífugas
 Turbina vertical
 Tipos de motores
 Cabezales
 Subestaciones
 Arrancadores

Ing. José Maldonado Rosas
 Ing. Juan Silva Zamudio
 Ing. Ariel Erosa Mendoza

13:00 a 14:00 P.M.

COMIDA

14:00 a 15:30 P.M.

TRATAMIENTO, DESARROLLO Y REHABILITACION

Ing. Juan José Rocha Range1

Limpieza
 Sifoneo
 Tratamiento con aire
 Pistoneo
 Hielo seco y nitrógeno
 Tratamiento con ácidos

15:30 a 17:00 P.M.

AFOROS

Ing. José San Vicente

Sistemas de aforo
 Interpretación
 Eficiencia

FECHA	DURACION	T E M A	PROFESORES
OCT. 24	9:00 a 13:00 P.M.	DISEÑO Y TERMINACION DE POZOS Finalidad del pozo Lavado inicial Ademes Filtros de grava Verticalidad Tapones de fondo Canastas Centradores y otros aditamentos Cementaciones	Ing. José Ma. Bolívar del Valle
	13:00 a 14:00 P.M.	COMIDA	
	14:00 a 17:00 P.M.	Flujo de agua a través de medios Porosos Contaminación del agua subterránea Uso combinador de agua superficial y subterránea	Ing. Tyler Jass
	17:00 a 19:00 P.M.	Mesa Redonda	Pleno de Profesores

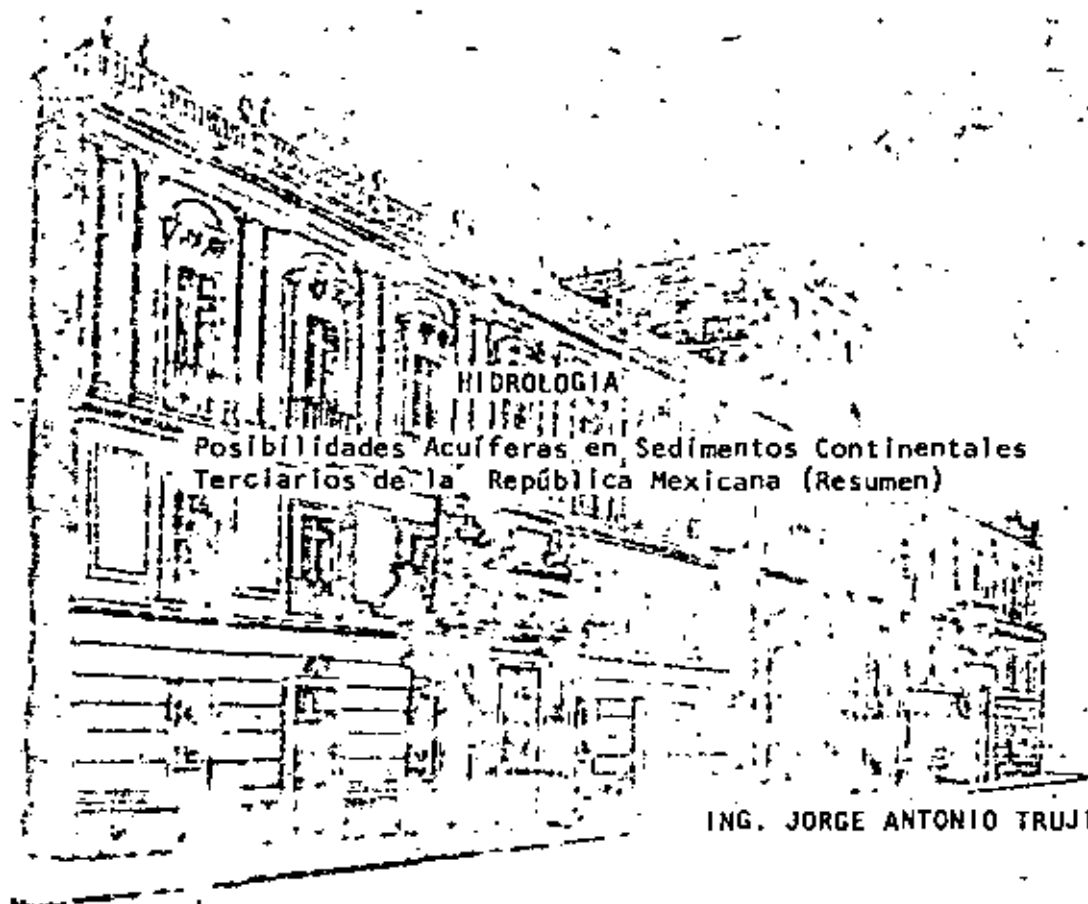




centro de educación continua
división de estudios de posgrado
facultad de ingeniería unam

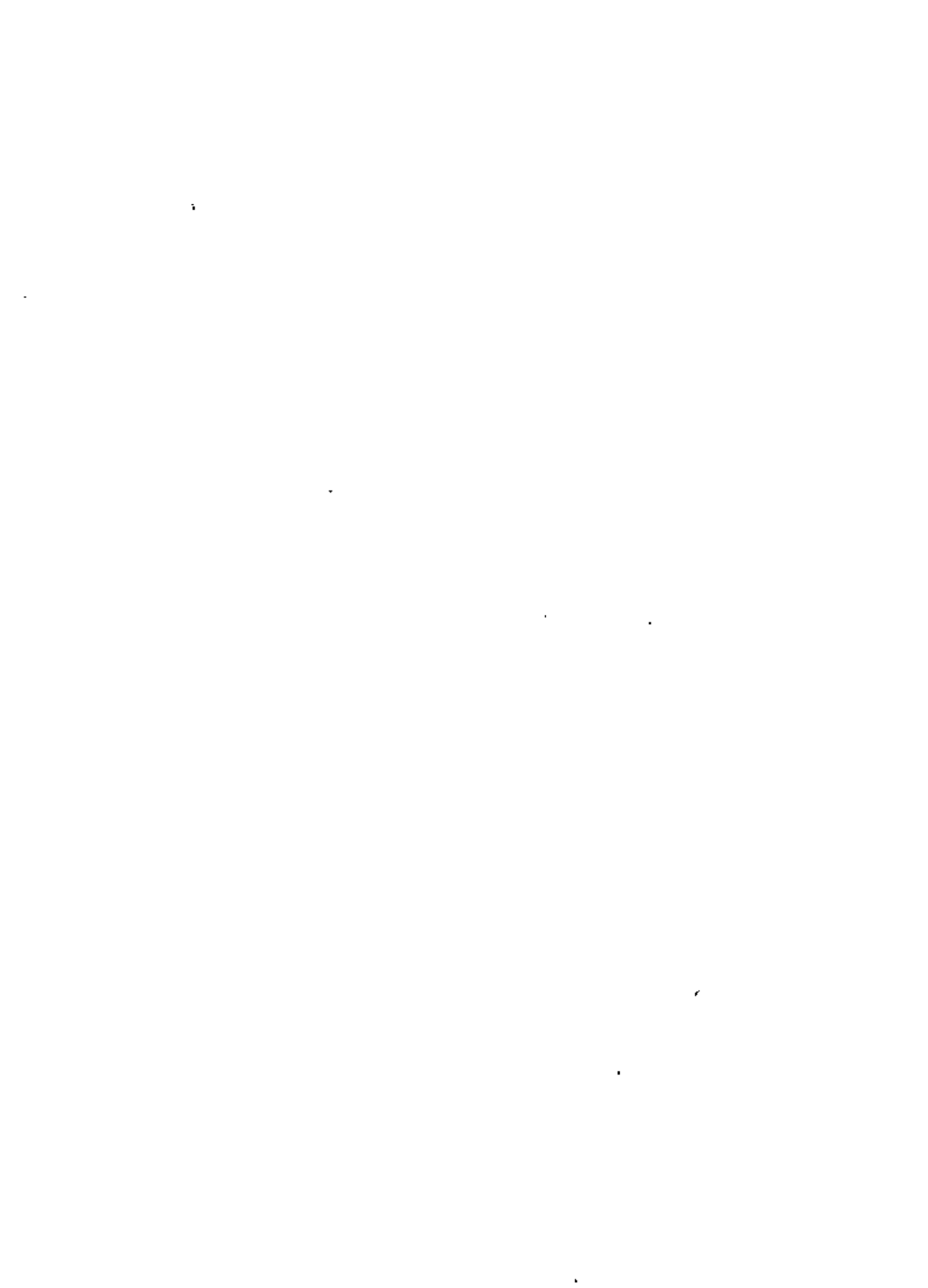


PERFORACION DE POZOS PARA AGUA



ING. JORGE ANTONIO TRUJILLO CANDELARIA

OCTUBRE, 1980



POSIBILIDADES ACUIFERAS EN SEDIMENTOS
CONTINENTALES TERCIARIOS DE LA
REPUBLICA MEXICANA.

R E S U M E N

Actualmente, la principal producción de agua subterránea del País, se obtiene de acuíferos en sedimentos clásticos continentales, constituidos por gravas, arenas y arcillas. Hasta hace poco tiempo, a estas unidades acuíferas se les consideraba simplemente rellenos aluviales y se les asignaba Edad Cuaternaria. Recientes investigaciones efectuadas por la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, de la S.A.R.H., han demostrado que la mayor parte de los sedimentos clásticos continentales del Altiplano y del Noroeste del País, fueron depositados durante el Período Terciario, en cuencas lacustres y aluviales, en épocas de gran actividad volcánica y tectónica.

Esta situación abre a la prospección geohidrológica, zonas antes desechadas por estar ocupadas por rocas volcánicas impermeables, como las tobas riolíticas, ya que de acuerdo con este nuevo concepto, dichas rocas pueden estar cubriendo o intercaladas con materiales clásticos permeables, lo cual ha sido comprobado en numerosas perforaciones en los estados de Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Querétaro y Guanajuato.

ING. JORGE A. TRUJILLO CARDELAIA.

POSSIBILIDADES ACUIFERAS EN SEDIMENTOS CONTINENTALES TERCIARIOS
DE LA REPUBLICA MEXICANA

Ing. Jorge Antonio Trujillo Candelaria.

INTRODUCCION. -

En el País, las aguas subterráneas se encuentran principalmente en tres diferentes tipos de rocas:

1. - Sedimentos clásticos continentales.
2. - Rocas volcánicas basálticas.
3. - Sedimentos marinos.

Actualmente la producción acuífera más importante, tal vez el 70% del total, se obtiene de los primeros.

Los sedimentos clásticos continentales están constituidos esencialmente por gravas, arenas y arcillas, con diferentes grados de selección y consolidación.

Hasta hace poco tiempo, a las unidades litológicas formadas por estos elementos clásticos, se les denominaba simplemente rellenos aluviales y se les consideraba de edad Cuaternario.

Recientes investigaciones efectuadas en la Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas de la S. A. R. H., han demostrado

Al comenzar el Período Terciario, durante el Paleoceno y Eoceno Inferior, la actividad de la Orogenia Laramide se incrementó notablemente acelerando el plegamiento y levantamiento de las sierras y transformando en áreas emergidas el Norte y Centro del País. (Fig. 3.)

En el Eoceno Medio, la Orogenia Laramide terminó y como consecuencia de ella se había formado una gran cuenca cerrada, limitada al W por la Península de Baja California (unida al continente) y la Sierra Madre Occidental, al S por la Sierra Madre del Sur y al E por la recién formada Sierra Madre Oriental. Hacia el Norte la cuenca se prolonga entre la Sierra Nevada y las Montañas Rocosas, en territorio de los Estados Unidos de Norteamérica.

En esa cuenca se depositaron en condiciones aluviales y lacustres, grandes volúmenes de sedimentos clásticos de tipo Molasse, característicos de la fase final de una etapa orogénica, los cuales están representados en toda el área por unidades litológicas que se conocen con el nombre genérico de Conglomerados Rojos, esta etapa estuvo acompañada de vulcanismo. (Fig. 4).

En el Oligoceno continuó el vulcanismo, al Sureste, la Península de Yucatán emergió parcialmente y al Noroeste la Peñínsula



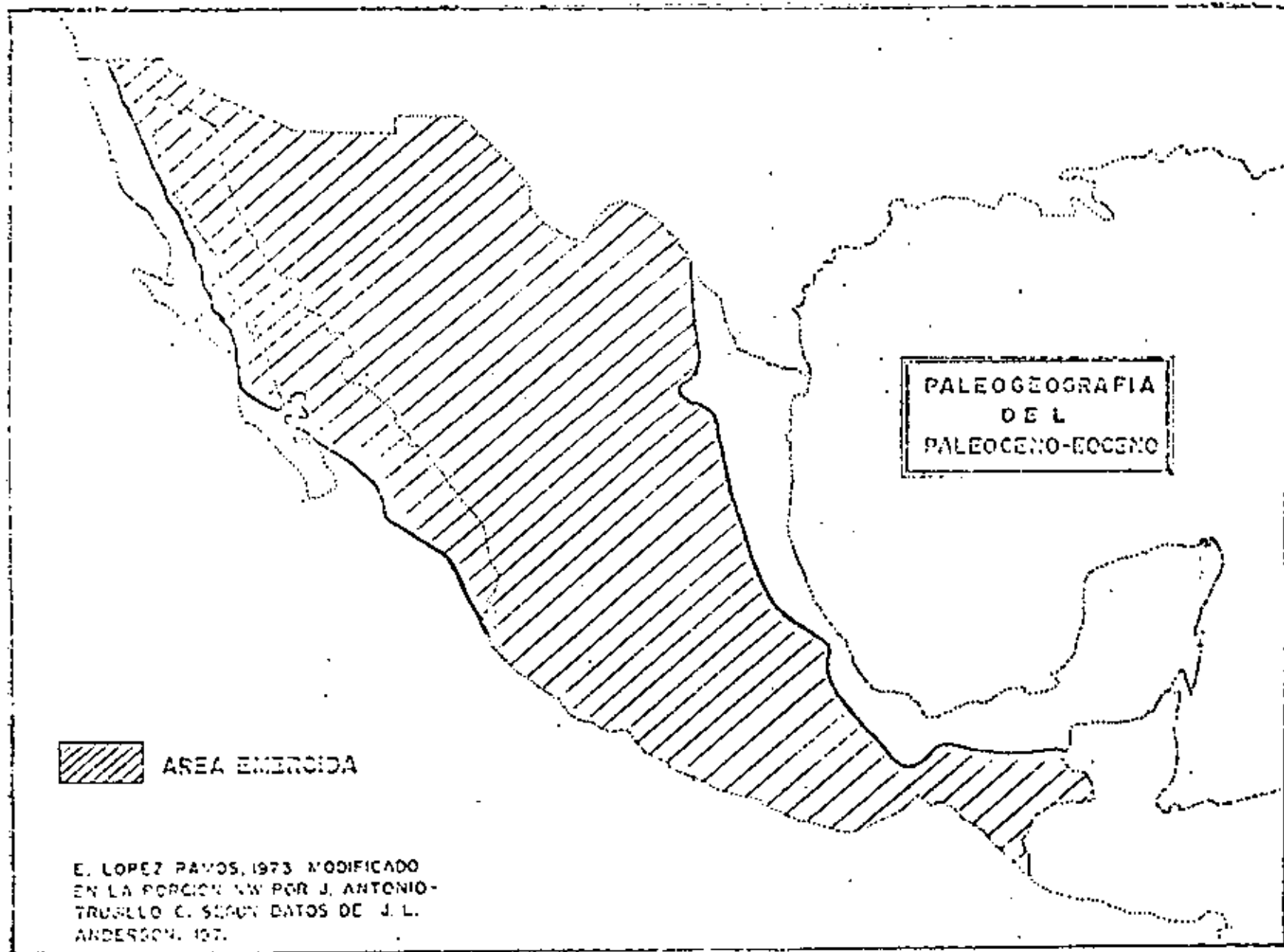
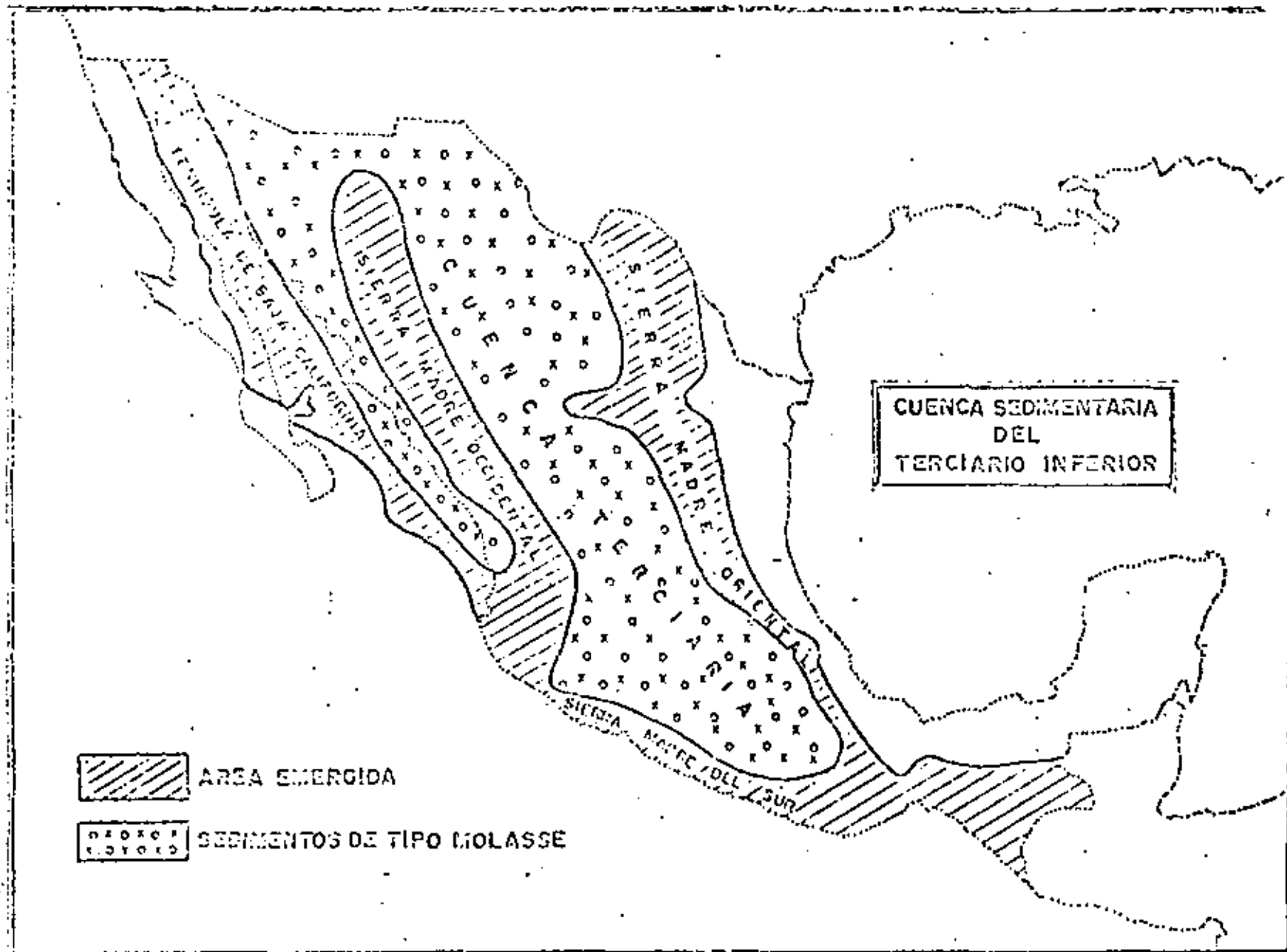


Fig. 3



CUENCA SEDIMENTARIA
DEL
TERCIARIO INFERIOR

ARSA EMERGIDA
SEDIMENTOS DE TIPO MOLASSE

FIG. 6

8



cula de Baja California inició su despegue del Continente.






Durante el Mioceno y Plioceno, existió gran actividad volcánica; en ese tiempo, a lo largo de la Sierra Madre Occidental, se formaron gigantescas acumulaciones de rocas efusivas predominantemente riolíticas cuyo afloramiento está considerado como uno de los más grandes del mundo. En la parte Central del País, una ancha franja que va de Puerto Vallarta, Jal., en el Océano Pacífico a las cercanías de el Puerto de Veracruz en el Golfo de México, se vió afectada por un movimiento de placas tectónicas el cual dió lugar a la formación de profundos grabens y a la aparición de numerosos volcanes de tipo andesítico y basáltico, iniciándose la formación del Eje Neovolcánico. (Fig. 5).

La acumulación de materiales volcánicos en la gran cuenca propició el bloqueo de drenes, dando lugar a la formación de extensas zonas lacustres en las que se depositaron enormes cantidades de sedimentos, éstos son, constituidos por gravas, arenas y arcillas, derivados principalmente de rocas volcánicas, provenientes de la erosión de las montañas circundantes. En esas zonas lacustres se presentaron, ocasionalmente, condiciones que facilitaron la depositación de yesos y calizas.

Intervalos de estabilidad permitieron el desarrollo de vida acuática, predominando las diatomeas, cuyos restos fósiles microscópicos, han ayudado a determinar la edad y el medio ambiente de depósito.



SIMBOLOGIA

-  Area emergido
-  Rocas riolíticas
-  Rocas andesíticas y basáltica
-  Sedimentos continentales
-  Rocas volcánicas y clásicas intercaladas y/o combinadas.

PALEOGRAFIA DEL MIOCENO - PLIOCENO

Fig. 5



El vulcanismo y la sedimentación se presentaron simultáneamente en esta época, por lo que sus productos se encuentran intercalados y en ocasiones mezclados, formando rocas volcanoclásticas de composición compleja.

La gran cuenca, que al principio del Terciario - debió presentar un relieve demasiado abrupto, al final del mismo presenta las características de un altiplano, pues los productos de la erosión de las montañas y los depósitos volcánicos habían rellenado las partes bajas - dándole un aspecto relativamente plano, y una altura media de unos 2000 - m. s. n. m.

Período Cuaternario. -

Al iniciarse el Período Cuaternario, hace aproximadamente 1 millón de años, los ríos del Pacífico y del Golfo, iniciaron el drenaje del Altiplano, desapareciendo paulatinamente los lagos y sometiendo a toda el área a un proceso de intensa erosión que persiste en nuestros días, el cual es propiciado por la geomorfología del territorio, ya que las corrientes que lo drenan, debido al gran desnivel entre el Altiplano y la - - Costa, tienen regímenes turbulentos con gran capacidad de arrastre. Fig. 6

Dadas las condiciones en que se está desarrollando el Cuaternario en el País; caracterizado más por la erosión que por el depósito, es evidente que el espesor de los sedimentos de ésta edad es muy reducido.



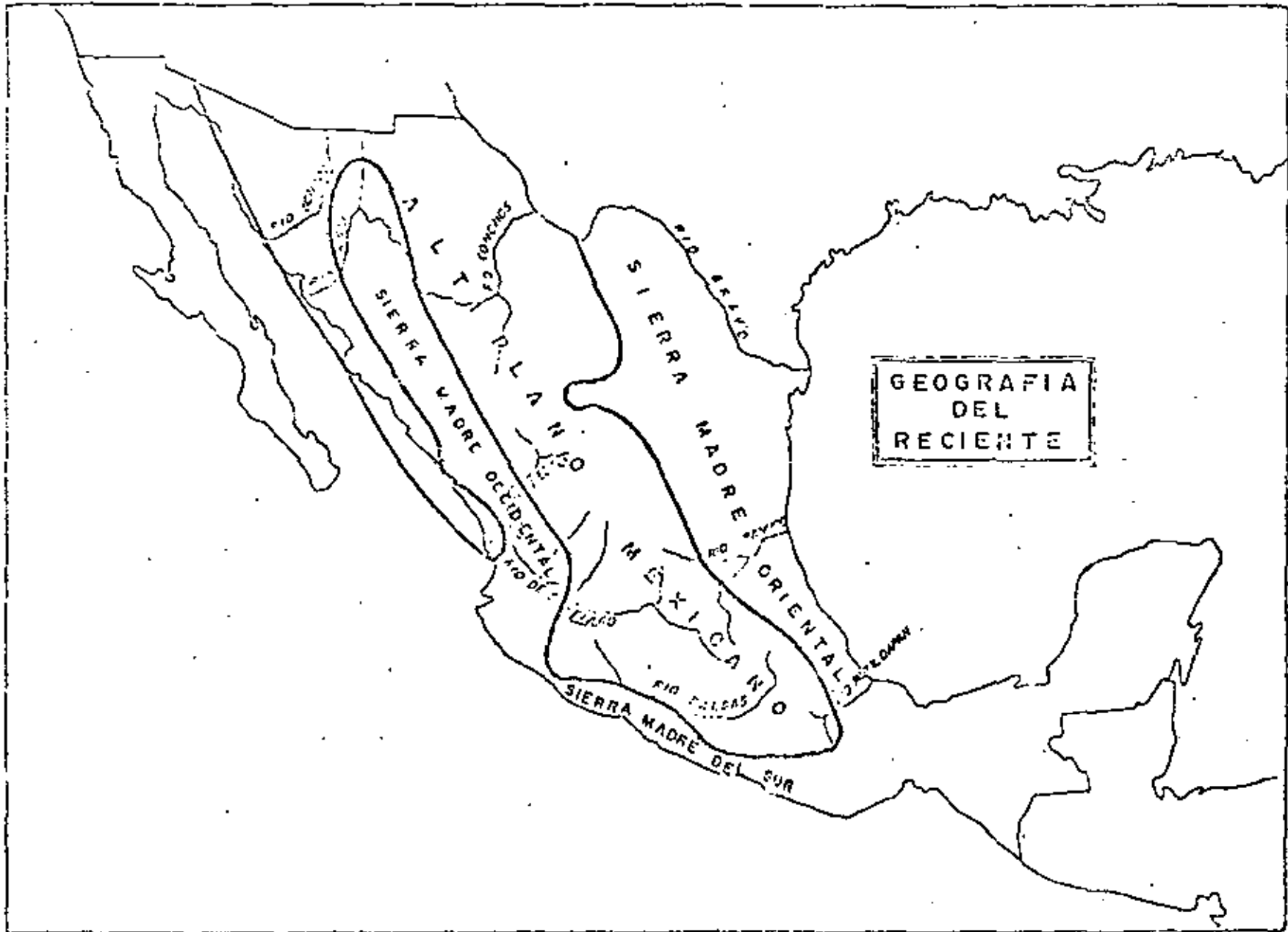


FIG. 6

En este período, el vulcanismo se ha presentado principalmente a lo largo del Eje Neovolcánico, produciendo rocas andesíticas y basálticas.

E S T R A T I G R A F I A

Se describe la columna estratigráfica del Terciario Continental, de la base hacia la cima.

Conglomerados Rojos, (Eoceno-Oligoceno). -

Descansando discordantemente sobre rocas cretácicas o más antiguas, se observan en numerosas localidades del Altiplano unidades litológicas, constituidas por conglomerados formados por fragmentos arredondados de caliza, riolitas, andesitas, rocas metamórficas, granitos, etc.; Predominando algunos de ellos según la región de que se trate, empaquetados en una matriz arcillosa o arcilloarenosa de color generalmente rojo, razón por lo cual se les conoce como Conglomerados Rojos. (Fig. 7)

Intercalados con los conglomerados, se encuentran capas de lutitas, areniscas, calizas lacustres, yeso y tobas de composición riolítica y andesítica.

Normalmente se presentan en estratos bien definidos con echados fuertes, afectados por fallas y fracturas, siendo por lo consiguiente muy raros los pliegues.



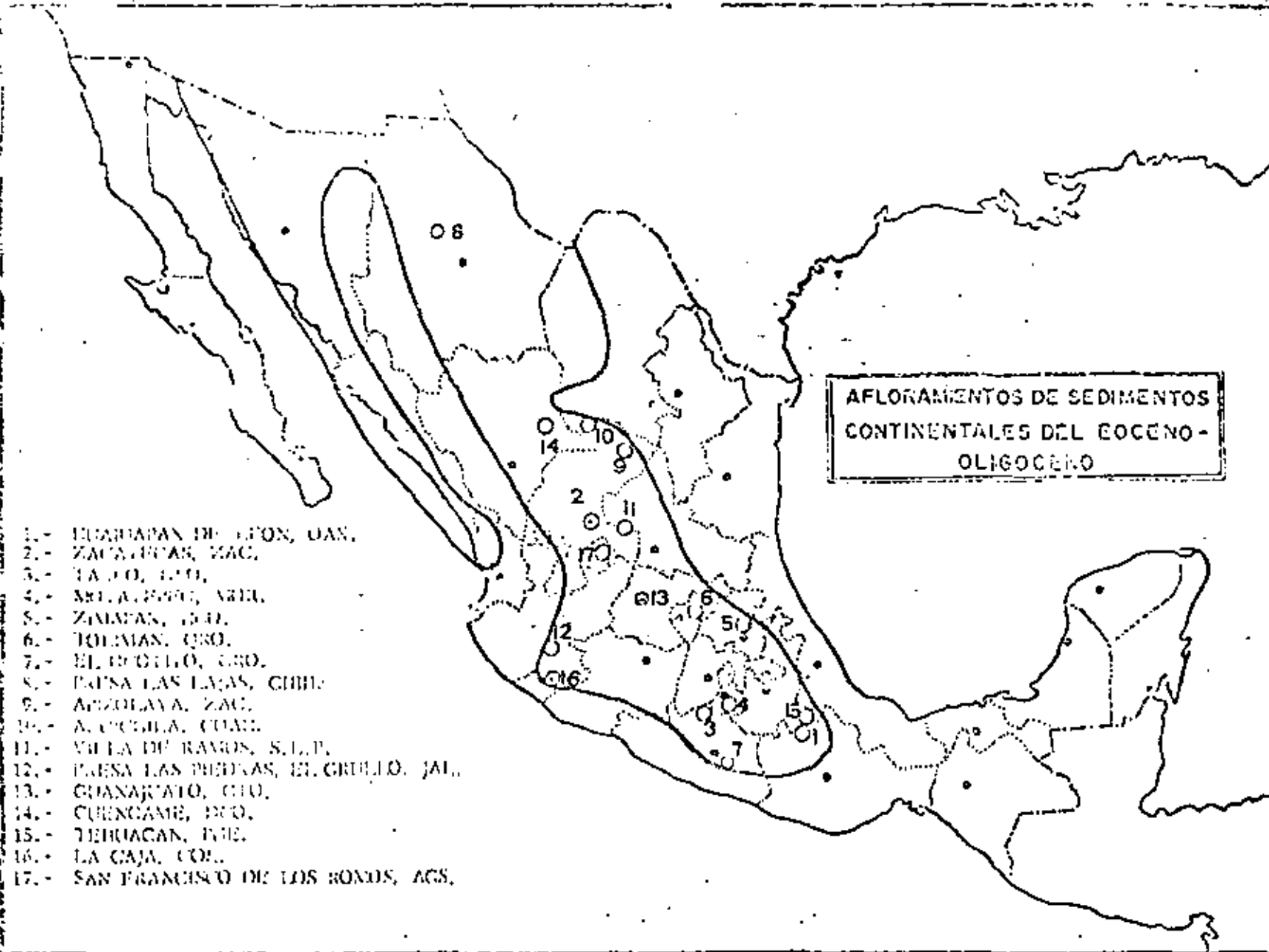


Fig. 7

Los siguientes autores han estudiado algunas formaciones de este tipo:

G. P. SALAS 1949 FORMACION HUAJAPAN en OAX.

J. D. EDWARDS 1956 CONGLOMERADOS ROJOS en ZACATECAS, GUANAJUATO Y TAXCO.

C. FRIES JR. 1960 GRUPO BALSAS en MORELOS Y GUERRERO.

K. BRYAN 1948 GRUPO EL MORRO en HIDALGO Y MEXICO.

ROGERS et al 1961 FORMACION AHUICHILA en COAH., ZAC., Y DGO.

Su espesor es muy variable aún en cortas distancias. J. D. Edwards 1956, midió secciones de 2,000 mts., 418 mts. y 475 mts., en Guanajuato, Zacatecas y Taxco respectivamente.

No ha sido fácil determinar la edad de los Conglomerados Rojos debido a su escasez de fósiles, sin embargo, en base a restos del cráneo de un pequeño roedor colectado por C. Fries Jr. 1952 en Guanajuato, se le dió edad Eoceno-Oligoceno, la que se ha ido corroborando por otros medios como se verá más adelante.

ROCAS INTRUSIVAS (Eoceno-Oligoceno). -

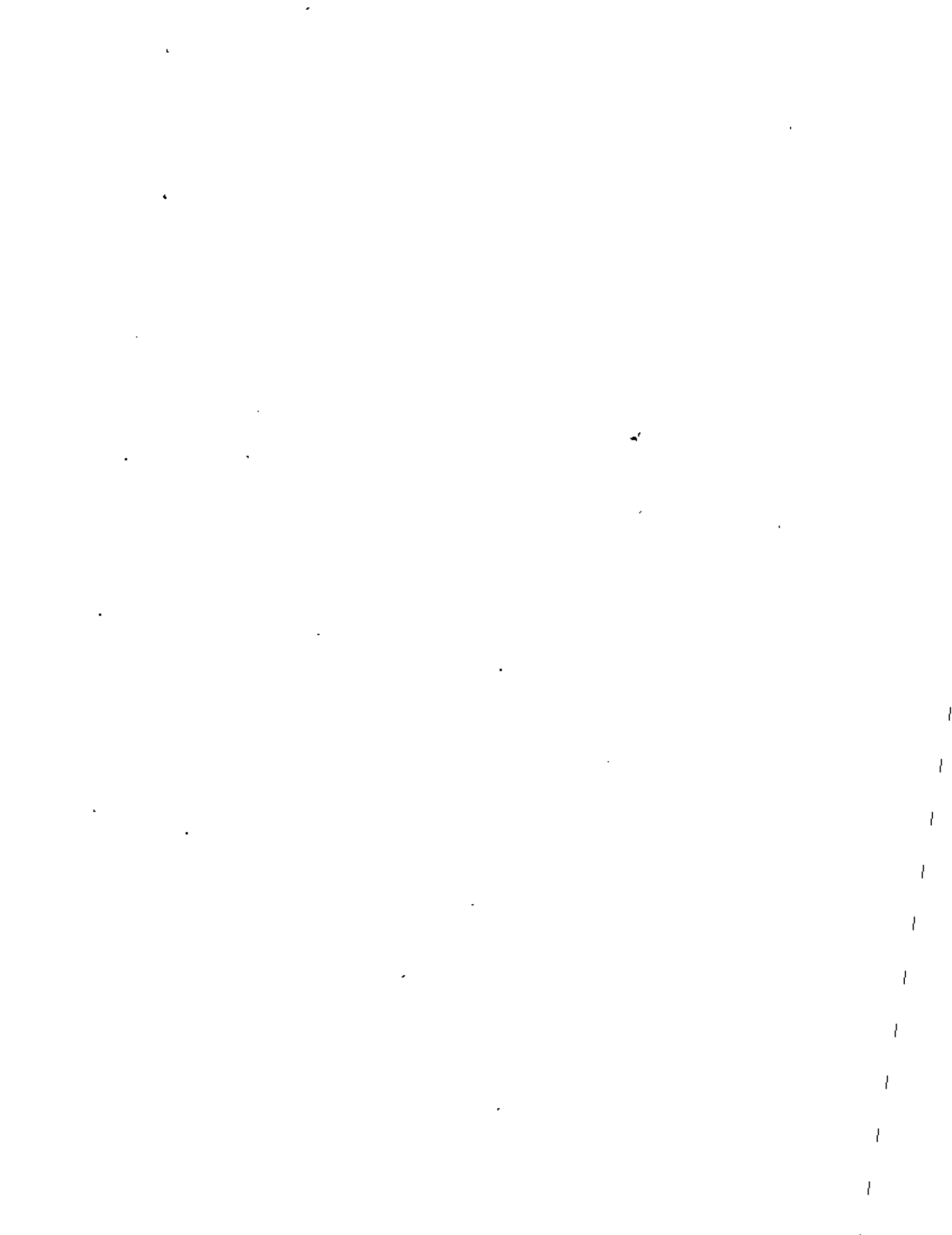


Jo a los Conglomerados Rojos, como el Tronco de Riolacita de La Imagen en Acaluizotla, Gro., 25 kms., al Sur de Chilpancingo, el cual intrusión al Grupo Balsas. A éste cuerpo se le determinó por métodos radiométricos una edad de 39 ± 5 millones de años antes del presente, (Z. de Cserna 1974), lo que equivale a Eoceno Superior;

En el Estado de Morelos, el Tronco de Granodiorita de Tlajca, 10 kms., al Sureste de Cuautla intrusión al Grupo Balsas y se le determinó, por el mismo método que al anterior, una Edad de 30 ± 3 millones de años antes del presente, lo que equivale a Oligoceno Superior (Z. de Cserna 1974).

ROCAS VOLCÁNICAS (OLIGOCENO). -

Intercaladas hacia la cima de los Conglomerados Rojos y cubriéndolos, se observan en toda el área, unidades volcánicas de tipo riolítico y andesítico. Algunas de estas unidades ya han sido estudiadas, como la Riolita Tilzapotla (C. Fries jr. 1960), la cual en Morelos y Guerrero cubre al Grupo Balsas. En la localidad tipo tiene un espesor de 250 mts. Su edad se determinó por el método radioactivo plomo-alfa, aplicado sobre Circon y resultó 25 ± 10 millones de años antes del presente (H. W. Jaffe et al, 1958), lo cual equivale a Oligoceno Superior, afianzando la edad Eoceno Oligoceno de los Conglomerados Rojos subyacentes.



Otros afloramientos de este tipo son:

Grupo Pachuca (K. Segerstrom 1961) consistente de rocas volcánicas andesíticas, riolíticas y basálticas las cuales en el Estado de Hidalgo y Norte del Estado de México descansan sobre los Conglomerados Rojos del Grupo El Morro.

Su espesor puede ser algo mayor de 1,000 mts., y su edad por correlación estratigráfica se considera Oligoceno.

Formación Vizcarra (S. Enciso de la Vega 1968). - Descansa sobre la Formación Ahuichila en el Area de Cuencamé, Dgo., y consiste de tobas riolíticas y algunos derrames andesíticos y basálticos. Por posición estratigráfica se le ha dado edad Oligoceno-Mioceno.

MIOCENO-PLIOCENO. -

Descansando discordantemente sobre los Conglomerados Rojos o sobre rocas más antiguas, se encuentran en el Altiplano Mexicano y el Noroeste del País, una gran cantidad de clásticos continentales y materiales volcánicos de edad Mioceno-Plioceno.

Muy pocas de estas unidades litológicas han sido descritas como formaciones e incluso, frecuentemente se les ha confundido con sedimentos recientes.



En seguida se presenta una relación de formaciones consideradas de ésta edad.

- FORMACION TARANGO (K. Bryan 1948) Clástico y volcánico, basáltico y andesítico, aflora en el D. F., Méx. e Hgo. Edad por estudios de diatomeas; Plioceno Medio-Plioceno Superior (J. Jiménez R. 1977).
- FORMACION TEPOZTLAN (C. Fries Jr., 1950) Clástica y volcánica andesítica, aflora en Edo. de Morelos, Edad por posición estratigráfica Mioceno Inferior.
- FORMACION CUERNAVACA (C. Fries Jr., 1950) Clástico y volcánica andesítica. Aflora en el Edo., de Morelos. Edad por Diatomeas: Plioceno Superior (según J. Jiménez R. 1977).
- TOBA DON GUINYO (K. Segerstrom 1961) Volcánica riolítica, aflora en el Estado de Hidalgo, Edad por restos de plantas, Plioceno Inferior.
- FORMACION SANTA INES (J. Pantoja-Alor 1963) Conglomerados de caliza y de rocas volcánicas, aflora en el Edo., de Durango, Edad por posición estratigráfica Plioceno Superior Pleistoceno.
- FORMACION CHILPANCINGO. (Ordoñez-Rose 1899) Clástica lacustre aflora en el Edo. de Guerrero (Z. de Czerna 1965) le da edad Plioceno y la correlaciona con la formación Cuernavaca.
- FORMACION LA ZORRA (S. Enciso de la Vega 1968) Volcánica basáltica con intercalaciones de arenisca, aflora en Durango. Edad por posición estratigráfica Mioceno-Plioceno.
- FORMACION SAN JOSE (S. Enciso de la Vega 1968) Clástica, aflora en el área de Cuencamé, Dgo., Edad por posición estratigráfica Plioceno Superior.
- FORMACION SANTO DOMINGO. (E. Carrillo Bravo, 1971) Clásticos, lacustres y fluviales, aflora en S. L. P. Edad por diatomeas: plioceno superior (según J. Jiménez R. 1977).



Para la datación de edades de unidades sedimentarias lacustres del Altiplano, se han practicado análisis palinológicos a base de diatomeas. Algunos resultados se muestran en la Tabla N° I.

PERIODO CUATERNARIO. -

Se considera que los sedimentos depositados durante este periodo, en el Altiplano, son en general de poco espesor, dado que el área se encuentra en una etapa de intensa erosión.

En el valle de México, aflora la Fm. Becerra constituida por sedimentos lacustres (Arellano 1953), el límite Sur del Valle, lo constituyen rocas basálticas del Grupo Chichinautzin (C. Fries Jr, 1960)

GEOLOGIA ESTRUCTURAL. -

Las unidades litológicas del Terciario Inferior Continental, tanto clásticas como volcánicas, se presentan en estructuras complejas, afectadas por fallas que se produjeron durante el Eoceno, al finalizar la Revolución Laramide. Durante el Oligoceno, continuó la deformación debido al emplazamiento de numerosos cuerpos intrusivos.





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

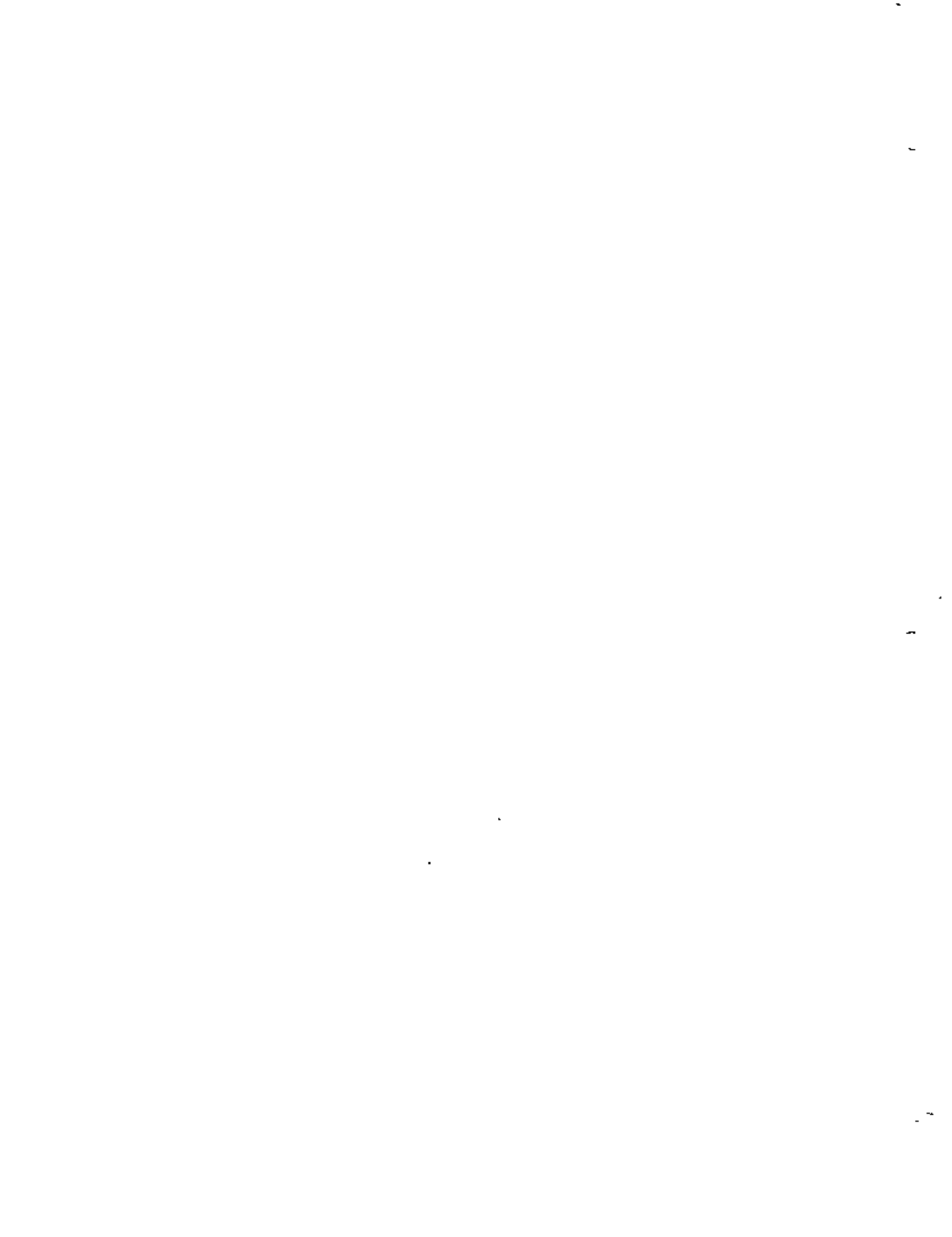


PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

LOCALIZACION DE SITIOS PARA PERFORACION

ING. ROBISEL CHIÑAS LALO

OCTUBRE, 1980



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

TEMA I: LOCALIZACION DE SITIOS PARA PERFORACION

1.1.- Introducción

1.2.- Geología del Agua Subterránea

1.3.- Hidrogeología

1.4.- Búsqueda de los Acuíferos

ING. ROBISIL CHINAS LAIO
Marzo 1978

I. - INTRODUCCION

I.1.- El Agua Subterránea y la Geología

El presente curso de perforación de pozos para agua, que está realizando el Centro de Educación Continua de la Universidad Nacional Autónoma de México, en colaboración con la Sociedad Geológica Mexicana, A. C., incluye dentro del temario un renglón que se refiere a la localización de sitios para perforar.

Esto resulta muy interesante si se considera que para el aprovechamiento óptimo de las aguas subterráneas se requiere de la participación de diferentes disciplinas y tecnologías relacionadas con la exploración, perforación, explotación, aprovechamiento y suso de los acuíferos subterráneos.

En el caso de la perforación de pozos para agua, una de las cuestiones que se plantean es el de fijar o el de elegir el sitio para perforar y la profundidad que éstas deben tener, a fin de no encontrarse con eventualidades y gastos innecesarios que eleven los costos de un proyecto relacionado al aprovechamiento de las aguas subterráneas. Para poder decidir sobre estos puntos tan importantes conviene recordar lo que es el agua subterránea y su relación con las ciencias geológicas.

El agua subterránea es uno de los recursos indispensables para la vida de una comunidad, porque su aprovechamiento como agua potable o para fines agropecuarios o industriales, así como su conocimiento en potencialidad permite planear el desarrollo social y económico de una región o de un país. Pero también es necesario advertir que el agua subterránea no es un recurso ilimitado, por lo que su preservación y uso óptimo debe ser controlado de la misma manera que ocurre con otros recursos naturales.

En un país como el nuestro que tiene predominio árido y semi-árido y donde el agua superficial es escasa, el subsuelo constituye la única fuente que puede proporcionar agua en forma permanente, de aquí que sea un recurso básico para el desarrollo del territorio nacional.

El agua subterránea también reviste gran importancia, no sólo en zonas áridas y semiáridas, sino en aquellas regiones que tienen una precipitación alta y donde se generan grandes ríos. Como particular el sureste de México y algunas zonas costeras del país.



En efecto el aprovechamiento de estos ríos requieren de grandes inversiones para ejecutar obras de almacenamiento y una infraestructura hidráulica muy costosa para la conducción de los recursos hidráulicos, en cambio, el aprovechamiento del agua subterránea ofrece la ventaja de diferir la inversión inicial requerida para conseguir el suministro necesario, es decir, con pocos recursos poner, prácticamente de inmediato, en marcha la producción de una zona.

El agua subterránea también tiene la ventaja de su permanencia en los almacenamientos subterráneos, mayor distribución espacial y menor exposición a la contaminación, por lo que se le prefiere en los usos doméstico e industrial, además de que se puede utilizar en forma combinada con el agua superficial cuando ésta no alcanza para irrigar una mayor superficie de terreno.

Pero así como el agua subterránea ofrece muchas ventajas, en contraposición resulta que los almacenamientos subterráneos no son ilimitados y la renovación del agua que contienen ocurre en forma lenta por lo que su explotación debe ser controlada a efecto de no crear un déficit entre el volumen renovable y el volumen requerido y producir desequilibrios ocasionados por la sobreexplotación.

Aunque a veces se justifica una explotación a costa del almacenamiento de los acuíferos es necesario conocer sus características y su potencialidad para no causar daños irreparables tales como: Incremento de los costos de bombeo, disminución del rendimiento de las captaciones, hundimientos de terrenos, formación de grietas, intrusión salina que cuando el agua es utilizada para riego, trae la consiguiente contaminación de suelos y el abandono de instalaciones productivas.

Estos problemas de sobreexplotación y otros ocasionados por la concentración de las explotaciones, o la contaminación que ocurre en terrenos altamente permeables, o de aquéllos de naturaleza arcillosa que tienen agua con niveles someros que propician inundaciones y terrenos de escasa potencialidad y con niveles profundos son derivados de condiciones climáticas, pero principalmente de las características que presentan las diferentes provincias geológicas. De ahí la enorme importancia que tiene el conocer las condiciones geohidrológicas de una región en donde se pretende explotar agua subterránea e incluso de aquéllas que ya se encuentran en explotación.

Lo que se busca entonces es determinar las características de la calidad y estructura del subsuelo y la distribución espacial en las diferentes formaciones geológicas, en forma tridimensional por donde se recarga, circula y acumula el agua de los almacenamientos subterráneos.

1.2.- Geología e Hidrogeología

La Geología como ciencia de la tierra se ha desarrollado siempre como el estudio cualitativo de los procesos que ocurren en la corteza terrestre; por ser una ciencia natural que se ocupa de las transformaciones de todo lo que ocurre en y sobre la superficie terrestre no puede estar desprovista de importancia práctica en cuanto a sus aplicaciones con relación al desarrollo de la humanidad.

De este modo se han desarrollado, en base a la geología diversas aplicaciones prácticas en relación con la exploración de recursos naturales, así como a la obtención de datos geológicos para la planeación y proyectos de obras de infraestructura. Ello ha permitido en la práctica de la geología la implantación de diversas disciplinas que se conocen como: Geología Petrolera, Geología Minera, Geotermia, Hidrogeología e Ingeniería Geológica.

Las necesidades de conocer y aprovechar mejor nuestros recursos naturales, así como el desarrollo que han tenido los procedimientos para las investigaciones de estas áreas, han creado verdaderas especialidades y en el caso del agua del subsuelo, que es atendida por la geohidrología, constituye la disciplina que estudia las leyes relativas a la existencia y movimiento de las aguas subterráneas.

Para su estudio la geohidrología se basa principalmente de la Geología porque presupone que son los factores geológicos los que condicionan su existencia, y también se auxilia de la hidráulica, matemáticas, geoquímica, geofísica, mecánica de suelos, probabilidad y estadística, hidrología superficial y subterránea, técnicas isotópicas y perforación de pozos.

Es de uso común utilizar el término Geohidrología para señalar aspectos más amplios del agua subterránea y la Hidrogeología como el estudio del agua subterránea con mayor atención énfasis en los aspectos geológicos, químicos y de circulación.

II.- GEOLOGIA DEL AGUA SUBTERRANEA

La Geología que se aplica en la hidrogeología no es una disciplina pura y abstracta, sino que es una geología que tiene que ver con las características de la calidad de las formaciones y la estructura del subsuelo por donde se alimentan, circulan y acumulan las aguas de los almacenamientos subterráneos y por ese hecho es del dominio común llamar a esta disciplina como Geología del Agua Subterránea.

La Geología del Agua Subterránea tiene por objeto esencialmente establecer el marco o modelo conceptual hidrogeológico que sirve de base para la interpretación de otras tecnologías que intervienen en las distintas etapas de los estudios geohidrológicos como son: La prospección, la evaluación y el manejo del agua subterránea.

Como la mayoría de los terrenos no son homogéneos, sino que por distintas causas presentan variaciones laterales y en profundidad, ello determina que la circulación y acumulación de agua ocurra bajo diferentes condiciones según la distribución espacial que presentan los materiales en la superficie y en el subsuelo.

Para comprender esto, es necesario analizar los procesos geológicos que han intervenido en la genesis de las rocas y los suelos, los cuales han dado lugar a las diferentes formas de terreno que se conocen.

II.1.- Procesos Geológicos

Los procesos geológicos son un conjunto de agentes de tipo físico y químico que determinan y modifican la forma superficial de la tierra mediante una dinámica interna y externa cuya energía proviene tanto del interior de la tierra (energía radioactiva) como del exterior (energía solar).

La geodinámica interna incluye procesos de tipo plutónico, volcánico, orgánico y epeirogénico que dan lugar a los relieves del terreno como macizos intrusivos, montañas y mesetas volcánicas y formación de montañas de bloques o plegadas.

La geodinámica externa interviene en los procesos de intemperismo remoción por gravedad erosión acumulación y deposición de sedimentos, acompañados de procesos diagenéticos... Estos procesos son los mas notables porque ocurren sobre la superficie terrestre y además porque la mayoría de los paisajes actuales, como la formación de redes hidrográficas, valles y llanuras son resultados de procesos geológicos evidentes, incluso en períodos cortos de tiempo.

Aunque en los trabajos de búsqueda de agua subterránea en general se engloban todos los conocimientos sobre los procesos geológicos esencialmente interesa analizar la geomorfología, la calidad de los materiales y estructura geológica.

II.2.- Geomorfología.

En el análisis de la geomorfología se trata de interpretar -- las formas del terreno, variaciones de las pendientes del relieve y las características del drenaje superficial.

Existe una gran variedad de formas del terreno que es conveniente agruparlas de acuerdo con su origen y estructura, integrándolas en provincias geológicas para facilitar su estudio, ya que es muy frecuente observar cierta relación de las formas montañosas con las divisiones climáticas, incluso de un continente a otro. Las variaciones del relieve en montañas lomeríos y llanuras determinan la presencia o ausencia de cobertura intemperizada y ésta a su vez es un factor muy importante en el escurrimiento superficial o en la retención del agua de lluvia.

Un factor que determina la configuración de las formas del terreno, es el drenaje superficial, cuyos arreglos y densidad permiten definir zonas que ofrecen escurrimiento o infiltración, además de aquellas zonas que ocupadas por ríos, lagos, pantanos y manantiales nos indican de la influencia que tienen en la recarga de los acuíferos.

Existen muchos arreglos del drenaje que indican características que tiene relación con las condiciones geohidrológicas por ejemplo: los drenajes de textura abierta se relacionan con materiales permeables, mas difíciles de erosionar o formaciones masivas y los drenajes con textura fina se desarrollan normalmente en materiales impermeables, en zonas fácilmente erosionables o donde el drenaje interno es lento.

La uniformidad del drenaje manifiesta también cierta homogeneidad en la constitución de los terrenos y susceptibilidad a erosionarse, en cambio las zonas no integradas o con ausencia de drenaje puede deberse a la presencia de aluviones granulares o de rocas permeables por fracturación o por cavidades de disolución.

Siempre conviene agrupar las características similares de los terrenos formando modelos que ayuden a establecer criterios que por analogías permitan estudiar zonas que carecen de información. Una clasificación útil y práctica de las formas de los terrenos es la de Von Engel, porque permite sistema-

tizar una variedad de formas en relación a la calidad y estructura de los terrenos agrupándolas en cinco clases y 19 unidades estructurales.

CLASIFICACION GEOMORFOLOGICA DE VON ENGELN

I.- CLASES DE ESTRUCTURAS SIMPLES.

A.- Unidades geomórficas de materiales no consolidados o debilmente consolidados que tienen en lo general una estructura horizontal o simple que está bien definida o en algunos casos poco definida.

- 1.- Llanura costera de levantamiento.
- 2.- Llanura o meseta de pie de monte.
- 3.- Llanura de tundra.
- 4.- Llanura fluvial, lacustre y deltaica.
- 5.- Erg o llanuras de dunas de arena.
- 6.- Llanura glacial.
- 7.- Llanura de loess.

B.- Unidades geomórficas compuestas de roca sedimentarias más o menos consolidadas o en algunos casos de rocas de origen ígneo. Los materiales, como en el caso A - se encuentran agrupados uniformemente y con una estructura simple.

- 8.- Meseta interior.
- 9.- Cuenca de lopolito
- 10.- Meseta o llanura de corriente de lava.
- 11.- Edificio volcánico.

C.- Unidades geomórficas de rocas casi totalmente calcárea con una estructura simple debido a la homogeneidad del material.

- 12.- Carst.
- 13.- Isla o barrera de coral.

II.- CLASES DE ESTRUCTURA DESORDENADAS.

D.- Unidades geomórficas plegadas o falladas que se formaron de rocas compuestas de sedimentos consolidados o que incluyen otros materiales sedimentarios.

- 14.- Domo de levantamiento.
 - a).- Lacolito
 - b).- Batolito
- 15.- Montaña plegada.
 - a).- de pliegues simples
 - b).- de pliegues dislocados
- 16.- Montañas de fallamiento.

E.- Unidades geomórficas constituidas principalmente por escudos de rocas rígidas y antiguas; en este caso la morfología puede ser de llanura, de meseta y de domo.

- 17.- Escudo de rocas ígneas metamórficas antiguas.
- 18.- Peneplano de sedimentos y de rocas ígneas.
- 19.- Glaciar continental.



De esta clasificación son las tres primeras o sea las que están relacionadas con clases de estructuras simples, las que normalmente tienen interés acuífero, justamente por que se acercan mas a la homogeneidad y porque o son materiales no consolidados o materiales rígidos pero fracturados.

11.3.- Calidad de los materiales.

Por definición los materiales que componen la corteza terrestre son rocas. Las rocas comprenden las formaciones geológicas que componen el suelo y el subsuelo, igualmente comprenden los fluidos que impregnan a estas formaciones (agua, gas, petróleo). Existe una variedad muy grande de materiales rocosos que se clasifican en base a su origen, textura, composición mineralógica y modo de ocurrencia y materiales sueltos que se clasifican tomando en consideración su granulometría, plasticidad y contenido de agua.

En geohidrología las variaciones en la calidad de los materiales influyen en la permeabilidad y en su porosidad y consecuentemente influyen en el flujo y almacenamiento del agua subterránea.

Desde el punto de vista del origen las rocas se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas: En la tabla se señala esta clasificación subdividiéndose en varios grupos. En la tabla 2 se presenta la clasificación de las rocas ígneas intrusivas y extrusivas con su composición mineralógica, así como la naturaleza de los piroclásticos y vidrios volcánicos. En la tabla 3 se han reunido a todas las rocas sedimentarias en función de su origen mecánico, químico y orgánico y en la tabla 4 se registra una clasificación de rocas metamórficas.

Los materiales que constituyen la corteza terrestre para fines de clasificación en las perforaciones, se muestran de tres maneras diferentes: suelo, fragmento de roca y roca.

El término suelo se aplica a todas aquellas partículas de material menores de 7.6 cm (3"). Fragmento de Roca se aplica a todas aquellas mayores de 7.6 cm. pero que no forman un macizo rocoso sino que los elementos sólidos están ligados entre sí por material suelto (suelo). El término roca se usa para cuando se tienen formaciones rocosas rígidas o altamente cohesivas.

TABLA 1

CLASIFICACION DE ROCAS

DIVISIONES	SUB-DIVISIONES	GRUPO	SIMBOLO
ROCAS	IGNEAS	EXTRUSIVAS	R_{ie}
		INTRUSIVAS	R_{ii}
	SEDIMENTARIAS	CLASTICAS	R_{sc}
		QUIMICAS	R_{sq}
		ORGANICAS	R_{so}
	METAMORFICAS	NO FOLIADAS	R_{mn}
		FOLIADAS	R_{mf}

TABLA 2

COMPOSICION Y CLASIFICACION DE ROCAS IGNEAS		
ROCAS	PRINCIPALES MINERALES QUE FORMAN LAS ROCAS	ROCAS
EXTRUSIVAS (Grano fino o porfirítico)		INTRUSIVAS (Grano grueso)
RIOLITA	CUARZO SiO_2	GRANITO
TRAQUITA		SIENITA
ANDESITA	FELDESPATO POTASICO (Ortoclasa) $KAlSi_3O_8$	DIORITA
DACITA	FELDESPATO SODICO-CALCICO (Plagioclasas) $CaAl_2Si_2O_8$ $NaAlSi_3O_8$	GRANODIORITA
BASALTO	Silicatos Ferromagnesianos Micas M.B. Hornblenda Piroxeno Olivino	GABRO
AUGITITA		PIROXENITA
LIMBURGITA		PERIDOTITA

ROCAS CLARAS

ROCAS OSCURAS **

ORIGEN	NATURALEZA	R O C A		
ERUPCIONES TRANQUILAS	VITREA	OBSIDIANA		
		PERLITA		
		PIEDRA POMEZ*		
		RETINITA (Piedra Pez)		
ERUPCIONES EXPLOSIVAS	PIROCLASTICA (FRAGMENTOS)	PIEDRA POMEZ BLOQUES		
		BOMBAS		
		Sueltas	Consolidadas	} AGLOMERADO
		GRAVAS	BRECHAS	
		LAPILLI	TOBAS	
		ARENAS	ARENISCAS	
		CENIZAS	TOBAS	
		POLVOS	TOBAS	

* Includo aqui solo por ser vitrea
** Rocas básicas

11
TABLA 3

ROCAS SEDIMENTARIAS			
ORIGEN	AGENTE TRANSPORTADOR	SEDIMENTO SUELT O	SEDIMENTO CONSOLIDADO
M E C A N I C O	AGUA	GRAVA (ARISTAS REDONDEADAS) GRAVA (ARISTAS AGUDAS) ARENA LIMO ARCILLA	CONGLOMERADO BRECHA ARENISCA LIMOLITA ARGILITA
	VIENTO	MEDANOS LOESS	ARENISCA
	HIELO	GRAVAS ANGULOSAS ARENA LIMO ARCILLA	TILITA
	GRAVEDAD	GRAVA ANGULOSA	BRECHA DE TALUD

ORIGEN	NATURALEZA	SEDIMENTO CONSOLIDADO
Q U I M I C O	CALCAREA	CALIZA DOLOMITA ARAGONITA TRAVERTINO MARCA
	CALCAREA ARCILLOSA	MARCA
	SILICOSA	PEDERNAL GEYSERITA
	SALINA	EVAPORITAS SAL GEMA YESO BORAX TEQUESQUITE CRISTALILLO
O R G A N I C O	CALCAREA	CALIZA CORAL COQUINA CRETA (SASCAB)
	SILICOSA	DIATOMITA (TIZAR)
	CARBONOSA	TURBA LIGNITO HULLA ANTRACITA

TABLA 4

ROCAS METAMORFICAS	
ROCA ORIGINAL	PRODUCTO METAMORFICO
ARENISCA	CUARCITA
CALIZA	MARMOL
LUTITA	PIZARRA
BASICAS	ESQUISTOS, SERPENTINA, ETC.
GRANITO, DIORITA Y CONGLOMERADO	GNEISS

Las propiedades de las rocas cambian lateralmente y en profundidad así en profundidad las rocas tienden a ser más compactas y una roca en superficie que se sustrae de la compresión puede constituirse en una roca que cambia sus características originales, sin embargo, como no siempre se tienen macisos homogéneos, principalmente en las rocas sedimentarias, se hace necesario conocer la superposición de las diferentes formaciones a través de la estratigrafía para definir su distribución geográfica y correlación.

En México se han determinado las secuencias estratigráficas en diferentes provincias geológicas; ello ha permitido conocer la posición que tienen algunos acuíferos principalmente en rocas calcáreas. En la Tabla 5 se muestra la tabla estratigráfica del estado de Nuevo León, donde formaciones del cretácico: Cuesta del Cura, Aurora y Cupido han sido detectadas con acuíferos importantes.

11.4.- Estructura Geológica.

El análisis de la estructura geológica se hace fundamentalmente para definir el grado de fracturación, posición, estratificación y potencia de las formaciones, características que permiten conocer el comportamiento geohidrológico de los terrenos.

Las provincias geológicas presentan una variedad muy grande de estructuras que a veces se observan en la superficie con rasgos morfológicos determinados y otras veces están enmarcadas o poco definidas por una cobertura intemperizada o por efecto de la erosión. Las estructuras más comunes que se presentan son:

Rocas estratificadas:	Sedimentos y rocas volcánicas
Rocas solubles:	Calizas y yesos
Rocas alteradas:	Por fracturación, metamórfico e intemperismo.
Rocas plegadas:	Sedimentarias.
Rocas foliadas:	Metamórficas.
Rocas Masivas:	Macizos rocosos

Las rocas estratificadas tienen una estructura bastante compleja no solo porque están falladas, plegadas y fracturadas, sino porque algunas tienen una disposición de asociaciones alternantes o con cambios de facies laterales de materiales de diferente permeabilidad.



TABLA ESTRATIGRAFICA DEL ESTADO DE NUEVO LEON

ERA	PERIODO	EPoca	E D A D	FORMACIONES	
CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTO	CUATERNARIO	LISSIE y ALUVIONES	
	TERCIARIO	MIOCENO	PONTIANO	GOLIAD	
			BURDIGALIANO	FLEMING	
			AQUITANIANO	OAKVILLE	
		OLIGOCENO	CHATTIANO	ANAHUAC	
				F R I O <small>ED. N. 1000</small>	CATAHOULA
			RUPELIANO	VICKSBURG	
		EOCENO	PRIABONIANO	JACKSON	
			LUTECIANO	YEGUA	
				COOK-MONTAIN	
			YPRESIANO	WILCOX-INDIO	
	PALEOCENO	MONTIANO	MIDWAY	VELASCO	
		DANIANO			
	CRETACICO	SUPERIOR	MAESTRICHTIANO	DIFUNTA	MENDEZ
			CAMPANIANO		
			SANTONIANO	PARRAS	SAN FELIPE
			CONIACIANO		
			TURONIANO	INDIURA	AQUA NUEVA
			CENOMANIANO	CUESTA DEL CURA	
		INFERIOR	ALBIANO	AURORA	TAMPS. SUP.
APTIANO			LA PERA	STAYES	
BARREMIANO			CUPIDO	TAMAULIPAS INFERIOR	
HAUTERIVIANO					
VALANGINIANO			TARAISES		
BERRIASIANO				TAMAULIPAS INFERIOR	
JURASICO	SUPERIOR (MILL.)	TITONIANO	LA CASITA	PIMIENTA	
		BONDIANO			
			HAVRIANO	OLVIDO	TAMAN
			SEQUANTIANO		
		ARGOVIANO	ZULOAGA		
	DIVESIANO				
	MEDIO (MILL.)	CALOVIANO		LA JOYA (CAPAS ROJAS)	
		BATONIANO		MINAS VIEJAS	
	INFERIOR (MILL.)		SAL *		
TRIASICO			CAPAS ROJAS (HUIZACHAL ?)		
Pz			ESQUISTOS y ROCAS VERDES (Rg. Aramberrí)		
PE			GNEISSES ?		

* INCLUYE CALIZAS Y ANHIDRITAS

TABLA 5



Esto mismo sucede con algunos materiales volcánicos de diferente emisión y composición (lavas y tobas) cuyas características de permeabilidad resultan diferentes.

En el caso de las rocas solubles, la presencia de cavidades, frecuentemente con una distribución irregular hace que la circulación de agua en una red cárstica presente serios problemas en su determinación.

Son muchos los casos en que las rocas presentan condiciones estructurales complicadas aún en las rocas foliadas y masivas. En la práctica las estructuras simples y homogéneas son poco frecuentes, salvo en algunas regiones que no han sido afectadas por procesos tectónicos o que están constituidas por materiales recientes.

III.- HIDROGEOLOGIA. Tomado de Hidrogeología de Davis y Weist 1971.

III.1.- Ciclo Hidrológico

Aunque la hidrogeología se refiere exclusivamente al estudio del agua subterránea, un buen hidrogeólogo debe tener sin embargo una cierta formación en todos los aspectos del ciclo hidrológico del agua, al menos en sus términos más generales, ya que en el fondo las aguas subterráneas no representan más que una parte del ciclo hidrológico total del agua.

Los océanos son los inmensos depósitos de los cuales procede toda el agua del ciclo hidrológico y a los cuales retorna. Esta definición es naturalmente un tanto simplista, pues no todas las partículas de agua recorren el ciclo hidrológico de una manera completa; éste sería por ejemplo, el caso de las partículas de agua que se evaporan sobre la superficie de la tierra y vuelven a la tierra en forma de lluvia, desde donde se evaporan de nuevo, y así indefinidamente, sin llegar nunca a alcanzar el océano. En el caso más completo del ciclo hidrológico del agua, ésta se evapora desde el océano, forma nubes, las cuales son transportadas hacia los continentes donde se condensan y caen en forma de precipitaciones, las cuales, a su vez, son conducidas por medio de los ríos y del flujo subterráneo hasta el océano. Existe una pequeña aportación de agua al ciclo hidrológico que procede de los procesos magmáticos y metamórficos, que no ha sido tomada en cuenta en este esquema; pero existe también en contraposición, una sustracción constante de agua al ciclo hidrológico que pasa a incorporarse a la estructura de los minerales y de los depósitos sedimentarios. Fig. 1

III.1.1.- La precipitación

El vapor de agua contenido en la atmósfera procede de la evaporación sobre la superficie de los continentes y océanos se condensa y precipita por causa, fundamentalmente, de tres fenómenos meteorológicos: 1) La mayor cantidad de agua se precipita a lo largo de los frentes de las masas de aire cálido y húmedo que se desplazan sobre las regiones de masas de aire frío. Este desplazamiento suele aparecer generalmente asociado a los grandes movimientos ciclónicos, que recorren enormes distancias. 2) Durante la estación cálida del año, el aire que se calienta en contacto con la superficie de la tierra tiende a ascender en grandes masas hacia las zonas altas donde existen masas de aire más frío. Este movimiento ascendente de convección puede ser provocado simplemente por la inestabilidad de una masa de aire ligera y cá-



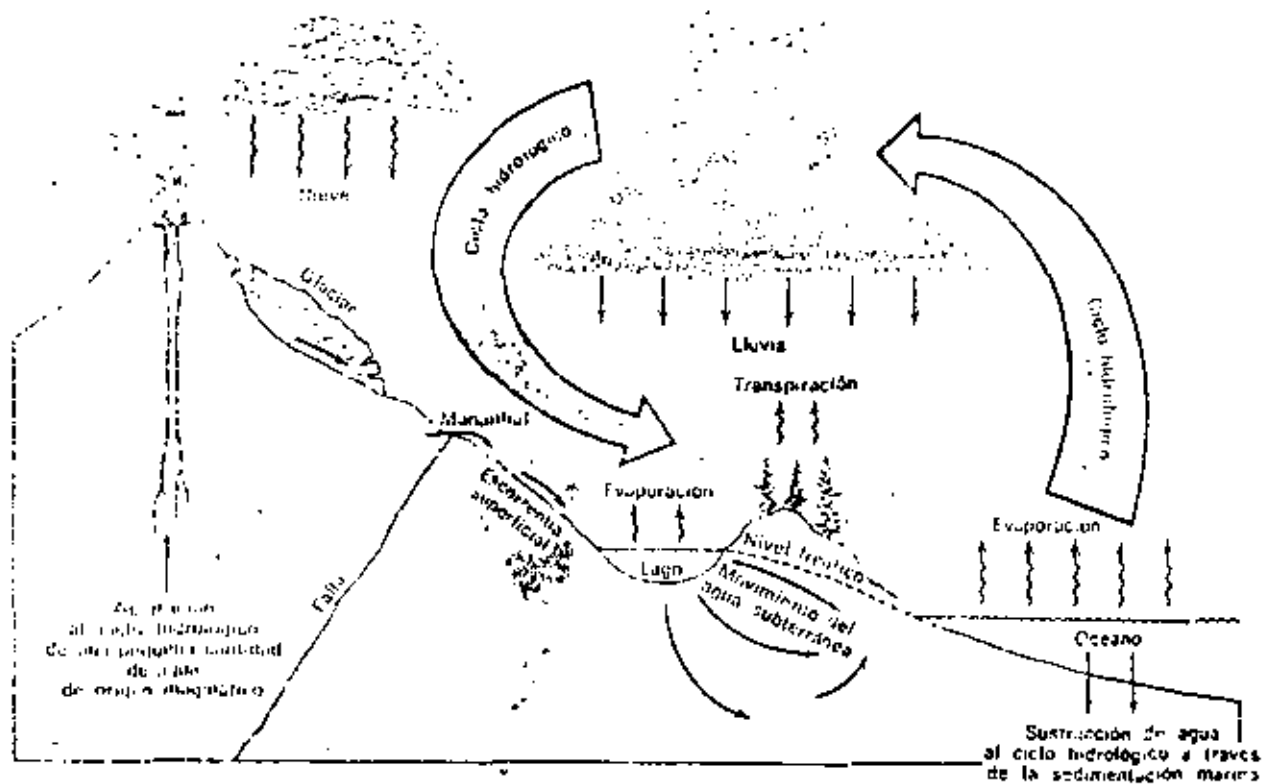


Fig. 1

Fig. 2 — Dibujo esquemático del ciclo de la escorrentía.

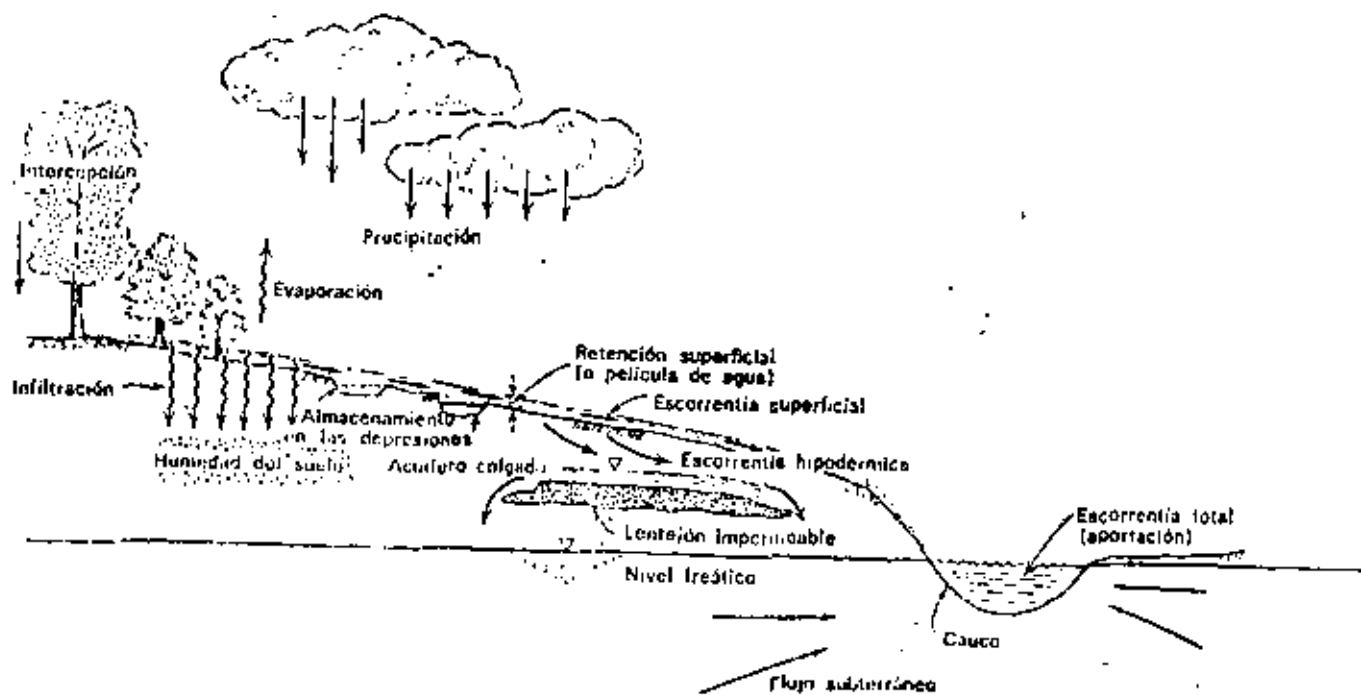


Fig. 2



lida situada por debajo de otra masa de aire más densa y fría aunque también puede ser producido por las corrientes de aire que ascienden sobre las barreras montañosas. 3) El tercer tipo de fenómeno es de carácter puramente orográfico; la precipitación, en este caso, se origina por el enfriamiento adiabático de las masas de aire a medida que éstas se desplazan sobre las elevadas barreras montañosas.

III.1.2.- La evapotranspiración

Una gran parte del agua que se precipita sobre la superficie de la tierra vuelve a la atmósfera en forma de vapor a través de la acción combinada de la evaporación, la transpiración y la sublimación, las cuales son, en esencia, tres variantes de un único proceso debido a la acción de la energía solar, que es la que mantiene el ciclo hidrológico en marcha.

La evaporación es el proceso mediante el cual las moléculas de agua de una superficie libre o de un suelo humedecido adquieren, mediante la radiación solar, la energía suficiente para escapar del estado líquido y pasar al estado gaseoso. La sublimación difiere del fenómeno de la evaporación solamente en que las moléculas de agua pasan directamente del estado sólido (nieve o hielo) al estado de vapor, sin pasar por el estado líquido. La transpiración es el proceso mediante el cual las plantas ceden agua a la atmósfera.

En muchas regiones, el volumen total de la evaporación real no puede ser considerado independientemente de la transpiración, de ahí que ambos efectos suelen ser considerados en conjunto bajo el concepto más amplio de evapotranspiración. Los pulmones de los animales también exhalan al aire cierta cantidad de vapor, pero se trata de una cantidad completamente insignificante en comparación con los efectos totales de la evapotranspiración.

III.1.3.- El Escurrimiento.

El término Escurrimiento es generalmente considerado como un sinónimo de aportación de un río; en este sentido representa la suma del escurrimiento superficial y del flujo subterráneo captado por los cauces de los ríos.

La expresión escurrimiento superficial suele referirse al volumen del conjunto de las precipitaciones que caen sobre una cuenca, menos la retención superficial y menos la infiltración (es decir el agua que llega a atravesar la superficie

del suelo). Hay que distinguir claramente entre el significado de infiltración y el de flujo subterráneo. Para la comprensión de la relación que existe entre precipitaciones y escurrimientos de vital importancia en muchos proyectos hidráulicos-puede ser particularmente expresiva la representación gráfica del ciclo del escurrimiento.

El escurrimiento superficial es función de la intensidad de la precipitación, de la permeabilidad de la superficie del suelo, de la duración de la precipitación, del tipo de vegetación, de la extensión de la cuenca hidrográfica considerada, de la profundidad del nivel freático y de la pendiente de la superficie del suelo. A pesar de esta complejidad del fenómeno, los hidrólogos tienen unos procedimientos que les permiten realizar una serie de análisis muy significativos sobre la forma de los hidrogramas y, en muchas zonas, pueden incluso llegar a hacer predicciones suficientemente precisas sobre el valor del escurrimiento superficial que se producirá como consecuencia de una gran precipitación de características determinadas.

La aportación de una cuenca se representa comúnmente en forma de hidrograma. El hidrograma es una curva que representa las oscilaciones -en función del tiempo- del nivel del agua de un río en una sección dada del mismo. En el caso de un río que posea un tiempo de descarga muy largo, los caudales que por él circulan al cabo de un tiempo son el resultado de la acumulación del escurrimiento superficial con la aportación subterránea.

El estudio de los escurrimientos de los ríos como parte del ciclo hidrológico incluye el de la distribución del agua y el de su trayectoria desde que ésta se precipita sobre la tierra hasta que alcanza la red hidrográfica o vuelve directamente a la atmósfera a través de la evapotranspiración. La proporción correspondiente a cada una de las partes entre las que puede distribuirse el volumen total de agua caída durante una precipitación dada, depende tanto de las características y condiciones físicas -naturales o artificiales- de la cuenca como de las características de la propia precipitación.

Al comienzo de una fuerte precipitación, una gran cantidad de agua es interceptada por la vegetación; el agua así almacenada sobre la superficie de la capa vegetal se encuentra muy expuesta al viento y ofrece una enorme área de evaporación, de tal forma que las precipitaciones de corta du



ración y poca intensidad pueden llegar a ser completamente consumidas por la intercepción, por la pequeña cantidad de agua que se infiltra a través del suelo y por el agua que llena los charcos y las pequeñas depresiones de la superficie del suelo.

Para que el agua llegue a infiltrarse, la superficie del suelo debe presentar una serie de condiciones adecuadas. Cuando a lo largo de una precipitación, el poder de intercepción y de almacenamiento en la superficie del suelo han sido ya agotados, y cuando la precipitación es tal que su intensidad excede la capacidad de infiltración del suelo, comienza ya el escurrimiento superficial propiamente dicha (fig. 2). La superficie del suelo se cubre en ese momento con una fina película de agua llamada película de retención superficial. Una vez que el agua que corre sobre la superficie del suelo y alcanza los cauces de la red hidrográfica, comienza a aparecer el escurrimiento superficial en los cauces.

Parte el agua que se infiltra en el suelo continúa fluyendo lateralmente como un flujo hipodérmico, que tiene lugar a pequeñas profundidades debido a la presencia de horizontes relativamente impermeables situados muy cerca de la superficie del suelo, alcanzando de este modo los cauces de la red sin haber sufrido una percolación profunda. Otra parte de esta agua infiltrada percola hacia la zona de saturación de las aguas subterráneas y, eventualmente, alcanza la red hidrográfica para suministrar el caudal de base de los ríos. Existe todavía otra porción del agua infiltrada que no llega a alcanzar el nivel de saturación de las aguas subterráneas y queda retenida en la zona situada por encima del nivel freático de las aguas subterráneas, llamada también zona de saturación in completa.

III.2. - Movimiento del agua subterránea

III.2.1. - Zona de humedad

La parte subterránea del ciclo hidrológico constituye el principal centro de interés del hidrogeólogo. En el subsuelo, el agua se puede encontrar bajo una amplia gama de condiciones que se extienden desde el agua que circula libremente hasta el agua que se encuentra firmemente fijada en el interior de las estructuras cristalinas. La mayoría de las discusiones clásicas acerca de las aguas subterráneas tienden a hacer fuerte hincapié en la existencia de diversos tipos de agua subterránea, más o menos bien definidos. En la figura 3 mos-

CLASIFICACION DEL AGUA DEL SUBSUELO

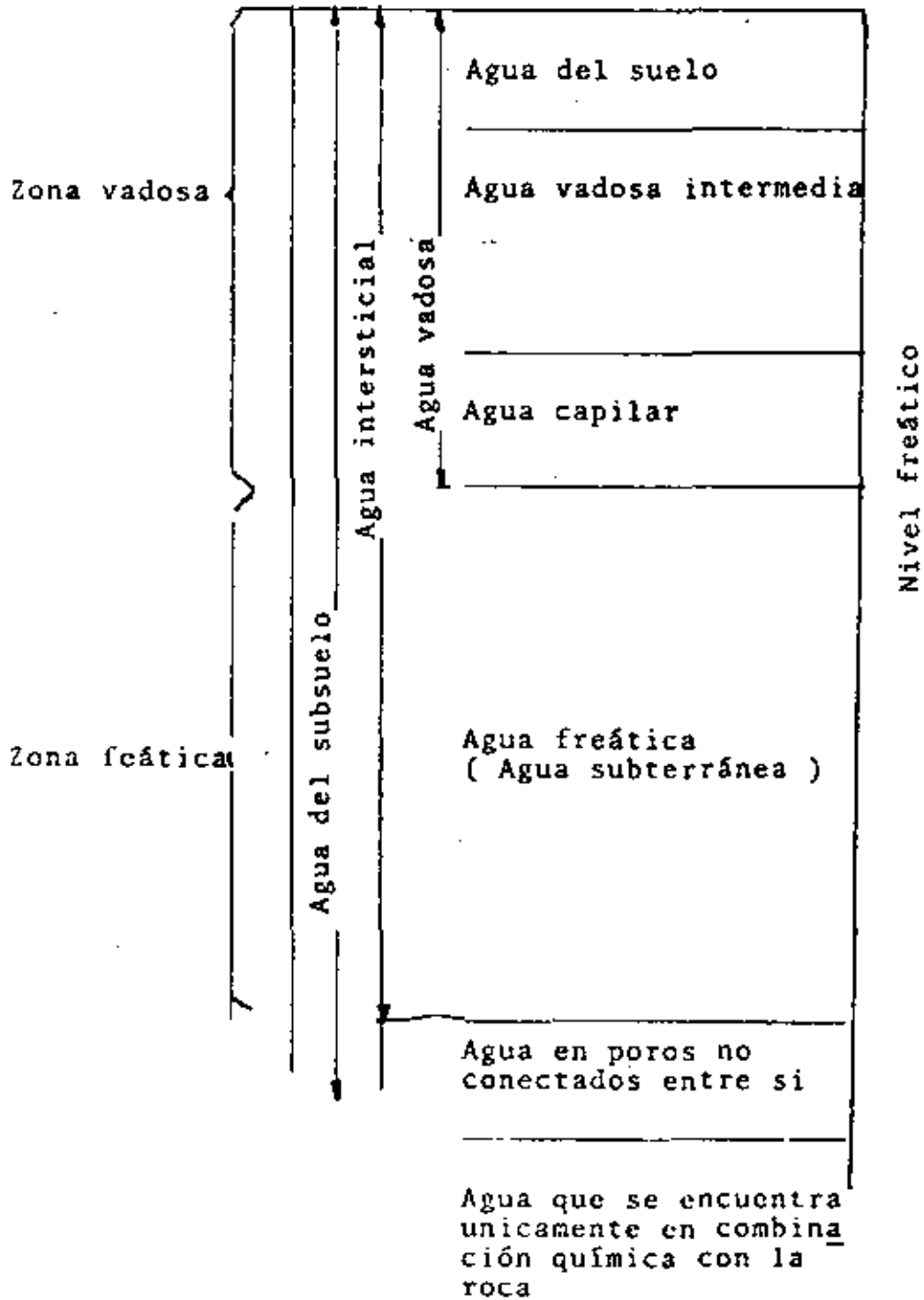


Fig. 3

tramos la clasificación de las aguas subterráneas. No existen, sin embargo, límites tajantes entre cada uno de los tipos de agua de estas dos clasificaciones; así por ejemplo, el agua del suelo está diferenciada del agua de las zonas más profundas.

Las fluctuaciones de humedad producidas por el efecto evapotranspirante de las plantas disminuye gradualmente en profundidad; de hecho, en las zonas de bosque normal, sólo algunas raíces llegan a alcanzar profundidades superiores a los diez metros. En las zonas más altas del suelo, hasta una profundidad de unos pocos centímetros, el contenido de humedad varía en función de las fluctuaciones de la temperatura y de la tensión del vapor, causadas por las variaciones de la temperatura del aire y del suelo. En las noches en las que el suelo pierde gran cantidad de calor por efecto de una fuerte radiación, tiene lugar, como consecuencia, una gran condensación de vapor de agua de la atmósfera sobre la superficie del suelo en forma de rocío; este fenómeno puede llegar a humedecer muy considerablemente los tres primeros centímetros del suelo. Durante los días cálidos, el agua es transportada hasta la superficie del suelo por la acción de las fuerzas capilares, desde donde puede ser evaporada a la atmósfera.

III.2.2.- Zona Intermedia

Generalmente existe una zona intermedia que separa la superficie superior de la zona de saturación de la zona de humedad del suelo. Al agua del suelo y a la de la zona intermedia se la suele denominar agua suspendida, o vadosa; esta agua se desplaza únicamente bajo la acción de la fuerza de la gravedad, por lo que también ha sido denominada por algunos autores con el calificativo de agua gravífica o gravitacional. En este libro no se utiliza este término por considerar que casi todos los desplazamientos del agua libre del suelo y del subsuelo están condicionados por la acción de la fuerza de la gravedad.

La zona intermedia puede llegar a no existir en el caso de medios muy húmedos o, por el contrario, puede poseer un espesor superior a los 300 m en el caso de las regiones áridas. Si el material de esta zona es isótropo y existe además una importante recarga de agua, su contenido de humedad estará generalmente comprendido entre un punto próximo a la saturación y un punto próximo al índice de retención específica del material en cuestión. Sin embargo, el terreno natural no suele ser homogéneo, con lo que la recarga se verifica de manera

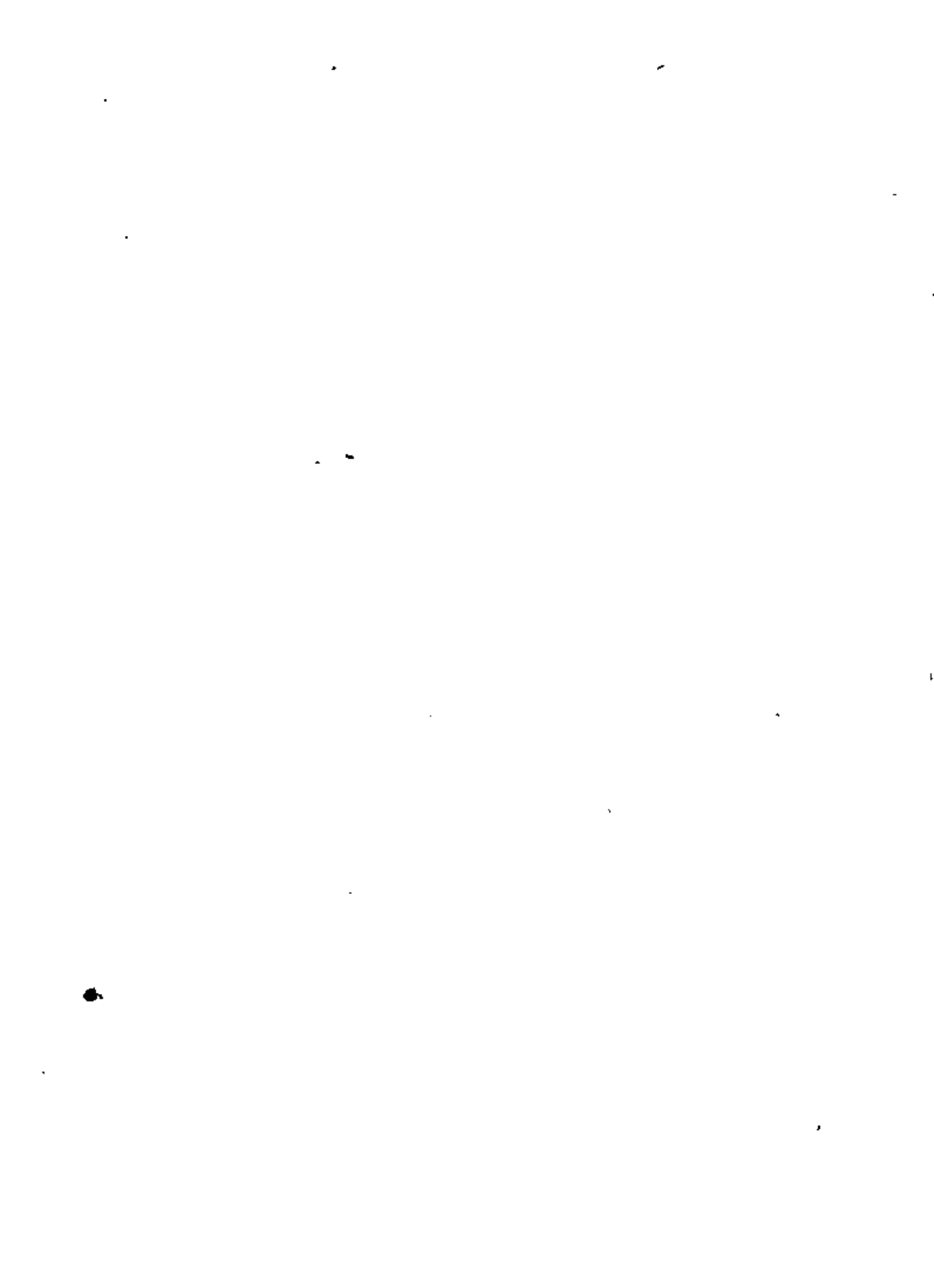
desigual, no uniforme, de unas zonas a otras. Esto se da particularmente en las regiones áridas, donde las precipitaciones son pocas veces suficientes como para satisfacer la capacidad de almacenamiento del suelo. En estas regiones, la principal recarga tiene lugar a través del lecho de los cauces de los ríos, donde se concentra el escurrimiento directo y donde los depósitos permeables de arenas y gravas suelen ser más abundantes. En muchas regiones, es probable que la zona intermedia nunca haya llegado a estar siquiera mojada.

III.2.3.- Franja Capilar

La zona intermedia, en su parte inferior, acaba donde comienza la llamada franja capilar. La transición entre ambas es más bien brusca en el caso de sedimentos de grano grueso, pero, por el contrario, puede llegar a ser prácticamente imperceptible en los limos y en las arcillas. En el caso de suelos de grano fino, si la recarga es activa, la diferencia del contenido de humedad entre la zona intermedia y la franja capilar puede llegar a ser muy pequeña. La superficie de la franja capilar, vista a gran escala, es irregular y su posición varía constantemente al variar el nivel freático y el caudal de la recarga. La parte superior de la franja capilar contiene numerosas bolsas de aire que pueden constituir un freno al movimiento descendente del agua. En la parte inferior de la franja capilar, el terreno alcanza justamente el punto de saturación total. Las fuerzas físicas que gobiernan el flujo del agua de la parte inferior de la franja capilar son prácticamente idénticas a las fuerzas que rigen el movimiento del agua subterránea en la zona de saturación.

III.2.4.- Superficie Freática.

La zona de aguas subterráneas, o aguas freáticas, está separada de la franja capilar por la superficie freática. La superficie freática es una superficie teórica que viene determinada de manera muy aproximada por el nivel de la superficie del agua en el interior de los pozos que justamente penetran en el interior de la zona de saturación. Si el flujo del agua subterránea es horizontal, los niveles del agua en el interior de los pozos corresponden exactamente a la superficie freática. Sin embargo la presencia de pozos de bombeo distorsiona la forma natural de las superficies equipotenciales y, con ello, el nivel del agua en el interior de los pozos.



Las definiciones más generalizadas de la superficie freática la consideran como la superficie que separa la franja capilar de la zona de saturación, o bien como la superficie definida por los niveles de agua en los pozos que alcanzan un terreno saturado en condiciones de no confinamiento. Una definición más exacta diría que la superficie freática es la superficie saturada de un terreno no confinado sobre la cual la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica.

III.2.5.- Zona de Saturación

El agua situada por debajo de la superficie freática es generalmente denominada agua subterránea, y la zona situada por debajo de esta superficie es llamada zona de saturación. Ambos términos suelen ser un tanto confusos a causa de su frecuente interpretación no científica. Frecuentemente el término agua subterránea suele hacer referencia a todo tipo de agua situada por debajo de la superficie del suelo, y el término zona de saturación suelo referirse a todo tipo de material saturado de agua. Por esta razón, proponemos la utilización del término "agua subterránea" como medio muy general de expresar toda el agua situada por debajo de la superficie del suelo. El término "zona de saturación" no es un término tampoco muy exacto, ya que la parte inferior de la franja capilar está también saturada. Teniendo en cuenta que el agua de la parte inferior de la franja capilar emigra casi con la misma velocidad que el agua situada justo por debajo de la superficie freática, no nos parece justificada esta definición de zona de saturación. Un término más aceptable para definir esta zona sería el de zona de agua freática, puesto que con este término se acostumbra designar el agua que puede entrar libremente en los pozos. El agua de la franja capilar no fluye a los pozos que la atraviesan, a no ser que se trate de un pozo de captación que penetre por debajo de la superficie freática y la capte indirectamente.

La zona de agua freática limita en su parte inferior con una zona donde la compacidad del terreno hace que éste contenga muy pocos poros, no conectados entre sí, con lo que el agua no puede emigrar en profundidad.

III.2.6.- Los Acuíferos

Solamente una reducida minoría de zonas freáticas puede suministrar caudales significativos de agua a los pozos que las atraviesan. Las zonas que poseen agua de llaman acuíferos.

Una roca que ni almacena ni transmite agua se llama acuífugo -término que contrasta, pues con el de acuífero, que se refiere a las formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir agua a los pozos gracias a los espacios porosos que existen en su interior, y con el de acuícludo, que se refiere a las formaciones geológicas que solamente almacenan agua, pero que no la transmiten en cantidades significativas-. El término acuitardo es también utilizado por algunos autores para describir las formaciones geológicas que, aunque almacenan agua y la transmiten en cantidades significativas a escala regional, no son suficientes para abastecer por sí instantáneamente a los pozos.

Los términos precedentes carecen todos de definiciones precisas en lo que respecta a las propiedades físicas mensurables de los terrenos acuíferos; de hecho, se ha dicho con frecuencia que un acuífero de una región desértica que pudiese suministrar a un pozo un caudal de 500 litros/día sería clasificado como acuitardo, o incluso como acuícludo, si ese mismo terreno estuviera situado en un valle aluvial colmatado por gravas, las cuales son capaces de suministrar volúmenes de varios miles de metros cúbicos al día. Por esta razón, algunos hidrogeólogos prefieren definir los acuíferos como zonas naturales situadas por debajo de la superficie del suelo que son capaces de suministrar agua en cantidades suficientemente grandes como para ser económicamente explotables.

Los acuíferos pueden estar constituidos por depósitos sedimentarios no consolidados, por rocas plutónicas masivas fracturadas, por estratos de areniscas porosas, por bancos de calizas carstificadas y por otros muchos contextos geológicos diferentes. Aunque se pueden hacer cálculos sumamente útiles partiendo de la hipótesis simplificadora de que los acuíferos son uniformes en su composición, horizontales y tabulares, el hidrogeólogo debe tener siempre presente que existe, sin embargo, una variedad casi infinita de formas y condiciones hidrogeológicas posibles. En los capítulos siguientes se analizan muchas de las posibles condiciones acuíferas que pueden presentar los terrenos geológicos en la naturaleza.

III.- 2.7.- Agua Confinada y no Confinada

El agua de un acuífero que se encuentra en contacto directo con la atmósfera a través de los espacios huecos de un terreno permeable se la denomina agua no confinada. El agua confinada está separada de la atmósfera por un terreno impermeable. La división entre aguas confinadas y no confinadas no tiene solución de continuidad. El término semiconfinado se utiliza para las condiciones intermedias. En muchas zonas, la primera

agua no confinada que se suele encontrar está frecuentemente por encima de la zona general de las aguas freáticas, constituyendo un volumen de agua más o menos aislado cuya posición está impuesta por la estructura y la estratigrafía del terreno; al agua que se encuentra bajo estas condiciones se la denomina agua colgada; su superficie freática recibe el nombre de superficie freática colgada. La distinción tajante entre agua confinada, semiconfinada, no confinada y colgada es generalmente muy difícil de establecer en la naturaleza.

Al agua confinada se le suele denominar también agua artesiiana. Esta expresión, sin embargo, fué aplicada al principio exclusivamente para las aguas subterráneas sometidas a una presión hidráulica suficiente como para dar lugar a pozos surgentes. En los últimos años, el término artesiiano se ha venido utilizando más o menos como sinónimo de confinado.

III.2.8.- Elementos de un Sistema Artesiano.

El concepto primitivo de flujo artesiiano estaba basado en una concepción análoga a la de un depósito estanco alimentado por una fuente de agua con una carga hidrostática situada a una cota superior a la del punto de descarga. La mayoría de los ejemplos de los libros de texto muestran, todavía hoy día, una estructura geológica sinclinal con una fuente de recarga situada por encima del nivel piezométrico del agua en un pozo de descarga, como ejemplo de un sistema acuífero artesiiano.

En estos libros se suele ver cómo el nivel piezométrico del acuífero se obtiene uniendo con una línea recta la posición del nivel del agua en la zona de recarga con la posición alcanzada por el nivel del agua en un pozo surgente. En estos ejemplos. El acuífero suele estar confinado por una formación porosa prácticamente impermeable, llamada acuicludo, o por formaciones ligeramente permeables, llamadas acuitardos. Esta imagen estructural clásica, si bien es cierta para una gran parte de los grandes sistemas artesianos, en la naturaleza, sin embargo, las variedades de condiciones hidráulicas de artesiianismo son infinitas.

III.2.9.- Origen de la Presión Hidráulica en los Acuíferos Artesianos.

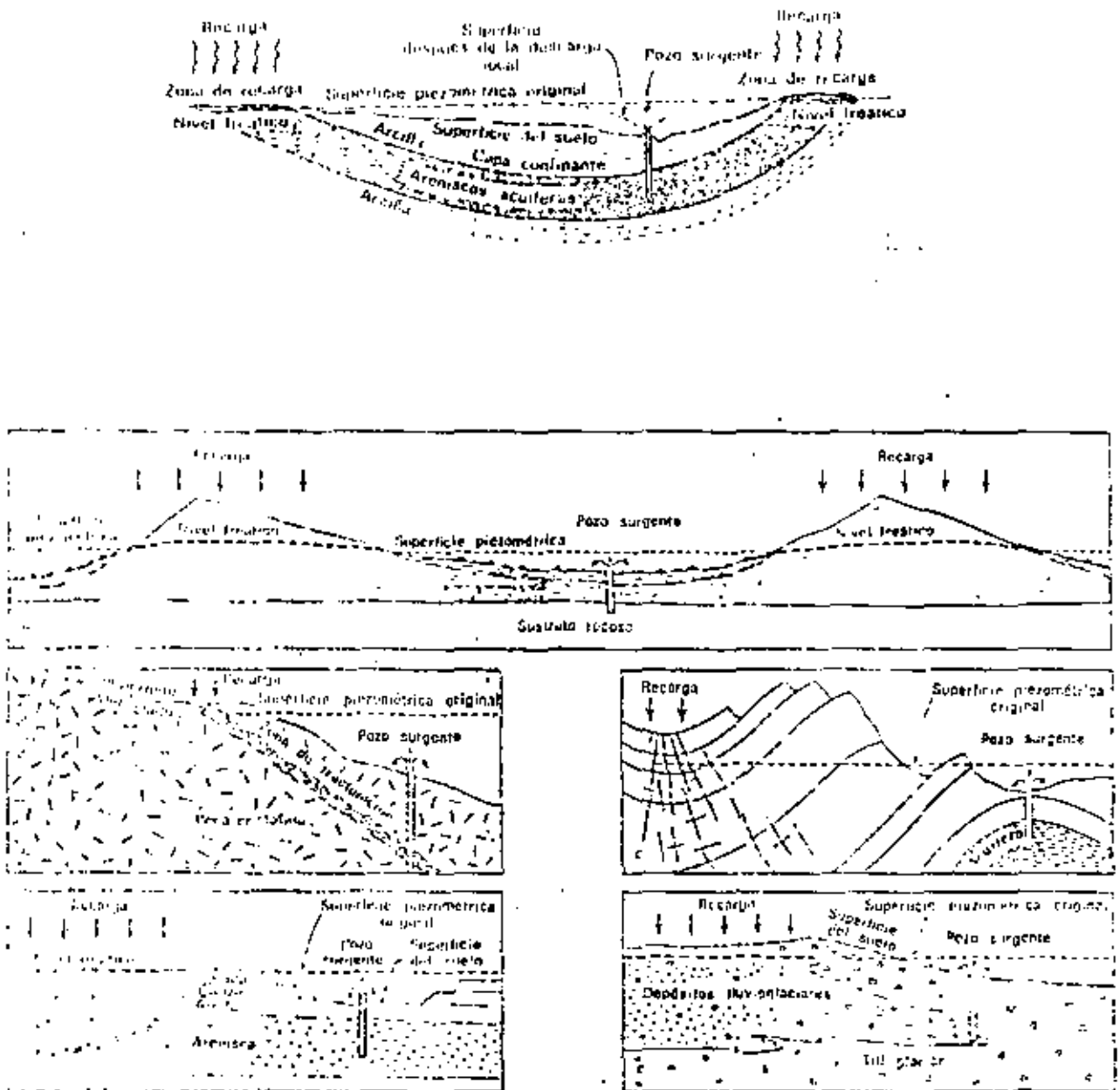
El solo hecho de que la cota del agua sea más elevada en la --



zona de recarga que en un punto de descarga de un pozo explica ya que éste pueda llegar a ser surgente. Esta explicación tan simplista sólo puede ser rigurosamente exacta en los casos de acuíferos de extensión local, en rocas consolidadas. Los acuíferos de gran extensión pueden presentar una complejidad notablemente mayor, siendo necesario recurrir a modelos gráficos más complicados para poder explicar satisfactoriamente el conjunto de fenómenos observados en la mayor parte de los grandes sistemas artesianos. fig. 4

Si un sistema artesiano fuera perfectamente rígido y estuviera saturado de un fluido ideal que no tuviera ninguna viscosidad y fuera incomprensible, los efectos de la descarga de un pozo serían observados a través de una caída instantánea del nivel del agua en todos los pozos del acuífero así como en la zona de recarga del sistema. Este fenómeno, sin embargo, no suele observarse en los sistemas artesianos, donde, por lo general, los efectos que producen los bombeos de los pozos son de un orden de magnitud tal que prácticamente quedan limitados a una zona próxima a los pozos bombeados que normalmente no suele ser superior a unos 15 km.

Meinzer fué uno de los primeros geólogos que siguió esta línea de razonamiento hasta llegar a una conclusión lógica. Meinzer observó que el nivel del agua en los pozos del gran sistema artesiano de Dakota, en los Estados Unidos, respondía solamente a los efectos de los bombeos locales; observó también que el volumen del cono de depresión creado por los bombeos era notablemente inferior al del agua bombeada. Los cálculos posteriores de Meinzer pusieron de manifiesto que el agua bombeada en los sistemas acuíferos confinados y semiconfinados proviene simultáneamente de tres fuentes principales: 1) Del agua que se desplaza dentro de la formación acuífera hacia la zona de descarga. 2) Del agua que sería expulsada al exterior, a través del pozo, por la compactación del terreno acuífero descargado. 3) De la expansión del volumen de agua comprimida en el acuífero. Concluyó que de estas tres fuentes, la segunda -el agua expulsada al exterior por la compactación del acuífero- era la más importante.



1. Pozos artesianos (surgentes) en dunas estabilizadas (a), en rocas cristalinas (b), en rocas sedimentarias completamente plegadas y fracturadas (c), en rocas sedimentarias horizontales (d) y en depósitos glaciares (e).

Fig. 4

IV.1.- FOTOINTERPRETACION GEOHIDROLOGICA

En nuestro país existen muchas áreas con escasa información geohidrológica, es necesario iniciar los estudios prácticamente desde la prospección o búsqueda del agua subterránea, fijando los sitios para las exploraciones geofísicas o para las perforaciones y posteriormente, en otras etapas, de la investigación de los recursos hidráulicos subterráneos se requiere el establecimiento de un marco geohidrológico o modelo conceptual que sirva de base para la interpretación del funcionamiento de los acuíferos a fin de definir las zonas de explotación más convenientes.

Mucha de la información necesaria para los estudios geohidrológicos puede ser obtenida con rapidez y bajo costo, mediante la interpretación de fotografías aéreas, ya que ellas ofrecen una visión regional del terreno, de todos los aspectos que interesan al estudio del agua subterránea, tales como la geomorfología, el drenaje superficial, las fronteras superficiales de unidades geohidrológicas, la vegetación y uso del suelo; la utilización de fotografías aéreas resulta favorable incluso para aquellas zonas que ya están en explotación o que cuentan con cartas geológicas, pues éstas generalmente no registran toda la información útil para el estudio del agua subterránea.

Por ser de mucha utilidad y por la riqueza de información que se obtiene de las fotografías aéreas, en estas notas se señalan los alcances y procedimientos de la fotointerpretación en el estudio del agua subterránea y sobre la manera más conveniente de registrar la información obtenida. Los criterios de interpretación pueden ser válidos tanto para fotografías aéreas verticales obtenidas con cámaras comerciales como para fotografías espaciales.

La interpretación de fotografías aéreas es una técnica basada en la observación y análisis de las imágenes fotográficas a fin de deducir el significado de ellas: la calidad y cantidad de información que se puede obtener, depende de la formación y experiencia del fotointérprete y del tipo de material fotográfico utilizado.



La técnica de fotointerpretación proporciona información eminentemente de tipo cualitativo mediante el análisis y clasificación de los rasgos que presentan los objetos fotografiados. Con este análisis se trata de establecer todos los tipos de interrelación que existe entre los rasgos y formas que han intervenido en su formación; de esta manera se establecerán diferencias y discontinuidades de los terrenos que luego es necesario rec^ortificar o ratificar en el campo; es por eso que esta actividad de ninguna manera desecha los trabajos de campo, aunque se ve considerablemente reducida, en virtud de -- que previamente se pueden ubicar en las fotografías aéreas los sitios de muestreo y se puedan programar los recorridos a los lugares de interés.

En los estudios de fotointerpretación intervienen distintos factores que influyen en la calidad de la fotointerpretación; entre los más importantes se tienen los siguientes:

- a).- Características de la fotografía aérea
- b).- La imagen estereoscópica
- c).- Característica de la fotointerpretación

Fotografías Aéreas. - Las fotografías aéreas de cje vertical es una proyección central que registra todos los objetos visibles en la superficie terrestre. Sus características geométricas resultan incorrectas debido al desplazamiento caudado por el relieve y por la distorsión de la cámara fotográfica. Existen numerosas características de las fotografías aéreas que influyen en la fotointerpretación y que son: calidad de la imagen, tipo de cámara, tipo de películas, tipo de filtro, proceso de revelado, estación durante la cual fué tomada la fotografía, escala, dirección del vuelo.

Entre la variedad de películas existentes, la película pancromática (blanco y negro) tiene el mayor uso y tradicionalmente es la que se ha utilizado en los trabajos de fotointerpretación, sin embargo, actualmente con el avance de las nuevas técnicas de percepción remota, se han desarrollado nuevos tipos de película y filtros permitiendo mejorar también la calidad de la fotointerpretación y consecuentemente obtener una mayor riqueza de información.



En la práctica de la fotointerpretación la utilización de las fotografías a color e infrarrojo a color, ha dado buenos resultados en los estudios de cobertura vegetal, suelos y cuerpos de agua, ya que por la calidad de la información, se disminuye considerablemente la verificación de campo.

La escala de la fotografía está determinada por la relación que existe entre la distancia focal de la cámara y la altura de vuelo. La elección de las escalas fotográficas depende mucho del tipo de trabajo por desarrollar; comúnmente se recomienda la escala 1:25,000 a 1:50,000 para trabajos de reconocimiento y 1:10,000 a 1:20,000 para trabajos de detalle; sin embargo, deben tenerse presente dos factores que incluyen en el uso de la fotografía y que son el relieve y la vegetación. Para fines geomorfológicos a veces es conveniente contar con fotografías de escala chica o espaciales, ya que en una sola fotografía pueden aparecer estructuras geológicas de conjunto, que a una escala mayor, serían registrados sólo parcialmente, por lo que estas estructuras pudieran pasar desapercibidas.

Esterescopía.-La interpretación de fotografías aéreas requiere primordialmente de la utilización de fotografías estereoscópicas y éstas no son más que fotografías que contienen rasgos y objetos registrados desde posiciones diferentes del avión y que al examinarlos a través de un estereoscopio se puede observar tridimensionalmente.

En general puede decirse que cuando los objetos son observados con un solo ojo. (visión monocular) estos se perciben únicamente en dos dimensiones y sólo la sensación de profundidad se obtiene utilizando los dos ojos (visión binocular). La visión estereoscópica es la reproducción artificial de la visión binocular y se puede obtener utilizando estereoscopios o anaglifos. Comúnmente en los trabajos de fotointerpretación se utilizan estereoscopios de lentes, prismas y espejos.

Características de la fotointerpretación.- La parte más importante de los trabajos de fotointerpretación la constituye el elemento humano ya que en la mayoría de los casos, la calidad depende fundamentalmente de la experiencia y formación profesional del intérprete; esto y los objetivos que persigue la fotointerpretación determinan el nivel y el alcance del trabajo.



La práctica de la fotointerpretación aconseja que los trabajos con fines geológicos, agua, suelos, bosques, urbanismo, actividades agrícolas, etc. sean desarrollados por personas con una formación acorde a esas disciplinas; las cuales deben reunir ciertas condiciones fisiológicas y psicológicas favorables para aplicar la técnica inductiva y deductiva que se utiliza en la fotointerpretación.

Para el caso de una interpretación geohidrológica los fotointérpretes, deben tener una base de conocimientos geológicos, hidrológicos y de uso del suelo; para poder --conceptuar a través de fotografías todos los factores que tienen relación con el agua subterránea.

De todas maneras, en términos generales; la fotointerpretación utiliza una serie de criterios para identificar, analizar y clasificar los rasgos fotográficos, bajo una visión estereoscópica, como son:

Criterios derivados de las características físicas de la fotografía como son: textura, tono y color fotográfico.

Criterios derivados de las características de tamaño y forma de los objetos fotografiados.

Criterios derivados de las características geomorfológicas de las zonas fotografiadas.

Criterios derivados de las características de los suelos, cobertura vegetal y su relación con el uso actualizado del suelo y la actividad agrícola.

IV.- RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

En la explotación del agua subterránea con frecuencia se plantea la necesidad de ubicar adecuadamente las perforaciones y la profundidad de ellas; esto se puede lograr si se conoce tridimensionalmente la estructura geohidrológica y las discontinuidades que presentan los terrenos.

Investigar la estructura del subsuelo en base a perforaciones resulta demasiado costoso y hacer exploraciones aisladas, sea por sondeos mecánicos o geofísicos, pueden proporcionar información falsa sobre las condiciones del subsuelo, ya que generalmente los terrenos no son homogéneos y presentan variaciones o discontinuidades tanto laterales como en profundidad.

Aunque hay varios procedimientos geofísicos para investigar el subsuelo, tratándose del agua subterránea, el que mayores ventajas tiene es el método de resistividad eléctrica, porque el recíproco de ésta o sea la conductividad eléctrica, esta íntimamente ligada a la naturaleza de los elementos sólidos (conductividad electrónica) y al contenido y calidad del agua que están en los intersticios de las rocas y los suelos (conductividad iónica).

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 la cantidad de agua disponible, sino que un conjunto de medidas de terminan como es la distribución de la corriente eléctrica en el subsuelo, lo que indudablemente está relacionado con su estructura geohidrológica. La interpretación y calibración posterior de las medidas resistivas con datos de perforaciones permite ver hasta entonces cual es el horizonte o cuerpo que tiene interés acuífero.

La ventaja del método resistivo, calibrado con perforaciones, estriba en que no se tiene una información puntual sino una información tridimensional de toda una cuenca geohidrológica.

Es por eso que la práctica aconseja que se obtenga una cantidad suficiente de medidas para poder registrar con seguridad las variaciones que muestran los terrenos, aún tratándose de definir la ubicación de una perforación, pues un sólo sondeo geofísico puede estar afectado por influencias laterales que distorsionan la realidad.

11.2.1.- Fundamentos

Existen varios métodos de investigación geofísica -- que se fundan en el estudio de la circulación de la corriente eléctrica a fin de establecer una relación entre la propaga-- ción de la corriente y las características físicas del subsue-- lo.

Esta circulación se produce en forma natural median-- te corrientes telúricas o en forma artificial cuando se intro-- duce una cantidad de corriente conocida, pues todos los mate-- riales facilitan en mayor o menor grado el flujo de la corrien-- te, ya sea a través de los elementos sólidos (conductividad -- electrónica) o por medio de los iones del agua que ocupa los - intersticios de las rocas y los suelos (conductividad iónica).

Una circulación artificial de la corriente es la que se lleva a cabo por el método de resistividad eléctrica, que - consiste en crear un campo de potencial al introducir una co-- rriente continua de intensidad conocida y medir los efectos -- que dicha corriente provoca, es decir medir el valor del poten-- cial o de alguna otra cantidad asociada con este flujo de elec-- trones.

La medición del campo eléctrico se logra mediante -- instrumentos y dispositivos de medidas tetrapolares (2 electro-- dos de corriente y dos de potencial), haciendo sondeos eléctri-- cos verticales o secciones cuya ubicación y arreglo, permite - obtener información sobre la distribución y anomalías de la co-- rriente eléctrica en el subsuelo y por tanto de su estructura.

Para los estudios geohidrológicos este método resul-- ta de gran valor porque la conductividad iónica está relaciona-- da con el volumen de los poros y con la disposición y el volu-- men de los poros reemplazados por agua, lo que significa que - si un terreno es compacto, presentará una elevada resistencia al paso de la corriente eléctrica; en caso contrario, si son - porosos, tendrán baja resistencia la cual disminuye más si los poros contienen agua.

La oposición que muestran los materiales al paso de la corriente es una resistividad aparente que resulta ser una función de la resistencia específica real de los terrenos que afectan la circulación de la corriente; entonces al hacer una investigación por el método de resistividad eléctrica, la base fundamental de ésta es determinar y analizar las resistivida-- des aparentes.



La determinación del valor de la resistividad aparente se obtiene mediante la medida de la diferencia de potencial entre dos puntos del terreno, con relación a la intensidad de la corriente introducida al subsuelo y a un arreglo geométrico de los electrodos de emisión (AB) y recepción (MN) de la corriente eléctrica (Figura 5).

La fórmula base se determina de la manera siguiente:

Considerando un medio homogéneo e isótropo como el de la Figura 6 que tiene una resistividad específica (ρ) en el que se coloca un electrodo en A y si se aplica una corriente de intensidad I y además se trazan dos espesores de radio (r) y $(r+dr)$ con centro en A se forma un cono de ángulo muy pequeño, la caída de potencial dV , originada por el paso de la corriente en el tronco de cono según la ley de Ohm se escribe:

$$-dV = \rho \frac{dr}{ds} I$$



Fig. 5

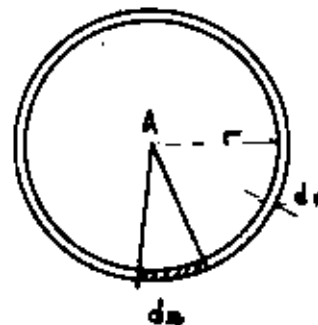


Fig. 6

Para la esfera total de radio r

$$-dV = \rho \frac{dr}{4\pi r^2} I$$

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \frac{1}{r} + cte$$

En el caso de una medición en el cual los electrodos estén situados en la superficie del terreno o sea en un semiespacio infinito entonces:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r}$$



En la práctica los métodos más utilizados emplean 4 electrodos. Si se aplica la fórmula anterior a un cuadrípulo cualquiera -- ABMN, en la que se tiene un circuito de emisión AB y otro de recepción MN (Fig. 7) los potenciales producidos se sumarán algebraicamente.

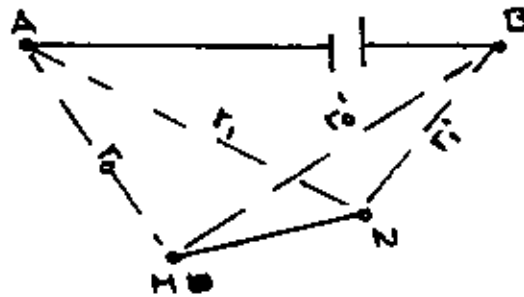


Fig. 7

En este caso el potencial en M y N será

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_0'} \right)$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1'} \right)$$

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_0'} \right) - \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1'} \right)$$

$$V_M - V_N = \Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0'} + \frac{1}{r_1'} \right)$$

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0'} + \frac{1}{r_1'}} \right)$$

si llamamos

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0'} + \frac{1}{r_1'}}$$

entonces

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

que es la fórmula general de resistividad para cualquier dispositivo cuadrípolar.



En el caso de un terreno cualquiera no isótropo ρ resulta aparente y la fórmula se expresa:

$$\rho_a = K \frac{V}{I}$$

El concepto de este valor radica en el hecho de que proporciona una medida que es función de la caída de potencial de los terrenos homogéneos y las unidades están expresadas en las dimensiones de una resistencia multiplicada por su longitud o sea en ohmios-metro (Ω/m); los demás factores que intervienen están expresados: (ΔV) en milivoltios e (I) en ----- miliampers; el valor K es de longitud y depende del arreglo y separación de los electrodos.



1 A. 2. 2. - Dispositivos de Medida

De manera general se puede decir que los métodos tradicionales de medida adoptan un arreglo cuadrupolar con 2 electrodos de emisión y 2 de recepción, en las que las separaciones pueden variar o permanecer constantes según sea el tipo de investigación por efectuar.

Los dispositivos de uso común más importantes son el Schlumberger y el Wenner, de los que se ha derivado una serie de variantes y combinaciones para realizar los trabajos en forma más expedita.

El arreglo Schlumberger es el más ampliamente usado en prospección eléctrica. Para este arreglo los 4 electrodos se colocan a lo largo de una línea recta sobre la superficie del terreno (Fig. No. II.4a), en el mismo orden A, M, N y B, la distancia AB suele ser mayor 5 veces a la separación MN ($AB = 5 MN$), en este caso la constante K de un arreglo simétrico AMNB es:

$$K = \pi \left(\frac{OA^2}{MN} - \frac{MN}{4} \right)$$

Por ejemplo, si se tiene un arreglo de $AB=100$ y $MN=20$, la constante valdrá:

$$K = 3.1416 \left(\frac{50^2}{20} - \frac{20}{4} \right)$$

$$K = 377.0$$

El arreglo Wenner también utiliza 4 electrodos equidistantes que se colocan en la superficie del terreno a lo largo de una línea recta (Fig. No. II.4b), así se tiene que:

$$AM = MN = NB = a$$

$$K = 2\pi a$$

en este caso el valor de K depende directamente del valor que tenga a ; por ejemplo si $a=30m$, entonces:

$$K = 2\pi \times 30$$

$$K = 2 \times 3.1416 \times 30$$

$$K = 188.5$$

Además de los arreglos electródicos antes mencionados existen una serie de variantes y combinaciones entre las que se cuenta la de Wenner-Lee, que utiliza un electrodo central, que permite comprobar la medición en ambos lados del dispositivo (Fig. No. II.4c); el valor de la resistividad aparente viene dado por la ecuación siguiente:

$$\rho_a = 4\pi a \Delta V \frac{\rho}{I} = 4\pi a \frac{\Delta V \rho}{I}$$

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$



Los tres arreglos descritos son los más utilizados en la prospección eléctrica aplicada para geohidrología.

11.2.3.- Trabajo de Campo

Los trabajos de campo consisten esencialmente en un reconocimiento del terreno para fijar los sitios de medición y la operación para obtener las medidas resistivas.

Reconocimiento del Terreno

En los estudios de resistividad eléctrica previamente se requiere realizar un reconocimiento de campo para ubicar adecuadamente los sondeos y los perfiles, mismos que estarán acordes con el objetivo y nivel de la investigación.

Durante este recorrido se debe tomar nota sobre la forma topográfica del terreno, las características de calidad y estructura geológica observable en la superficie, así como los escurrimientos y arreglo de la red hidrográfica. También es necesario obtener información sobre los aprovechamientos hidráulicos superficiales y subterráneos para que sea utilizada y tomada en cuenta tanto en la fijación de los sondeos como en el proceso de interpretación de medidas.

Una manera de auxiliarse en el reconocimiento de campo es mediante la interpretación de fotografías aéreas, porque en ellas se pueden delimitar las variaciones que tienen las rocas y los suelos y hacer un análisis de la estructura geomorfológica. Este procedimiento además de proporcionar una riqueza de información, es rápida y económica y dará una base objetiva para hacer posteriormente una correlación de resultados.

Al registrar todos los elementos que se identifiquen en la superficie del terreno, se estará en posibilidad de decidir sobre los dispositivos de medida, separación de los electrodos, y las diferentes profundidades a que deberá orientarse la investigación.

Operación de Campo



La ejecución de un programa de exploraciones en el campo es parte fundamental dentro del proceso de investigación, ya que de su buena realización depende el resultado final del estudio, por lo que las medidas deberán realizarse correctamente.

El proceso para realizar un programa de investigaciones debe incluir sistemáticamente los siguientes pasos:

- a) Preparación del dispositivo e instalación del equipo.
- b) Obtención de la medida
- c) Comprobación de las medidas y trazo de la curva del sondeo
- d) Observaciones durante la medición y tipo de registro.
- e) Sondeos de prueba y de correlación
- f) Separación de sondeos y promedio de medidas.

a).- Preparación del dispositivo e instalación del equipo.- Una vez seleccionado el punto por investigar, se coloca en dicho sitio una estaca con su número correspondiente, se señala el rumbo del dispositivo de acuerdo con el programa previsto o en su defecto hacia las zonas de mejor acceso para el dispositivo de medida, se proporciona al personal una cuerda de 100 m y se les dan instrucciones sobre las sucesivas posiciones del cuadrípolo MNB, la cual depende del dispositivo empleado. Las maniobras anteriores deberán realizarse simultáneamente con la instalación del equipo de medida.

b).- Obtención de la medida.- Una vez instalado el equipo y verificado la correcta posición de los electrodos se procede a verificar la calibración del instrumento de medida, este paso deberá realizarse antes de iniciar cada sondeo; posteriormente se efectúa la cancelación de las tensiones parásitas y se procede a realizar las medidas de V_e e I correspondientes a la primera estación; enseguida, los obreros desplazan los electrodos a las demás posiciones; en cada posición deberá compensarse la tensión entre los electrodos M y N y realizar la medición lo más rápidamente posible. Lo anterior se repetirá en cada estación hasta terminar con el sondeo.

La realización de las medidas depende mucho del equipo que se utilice. A continuación se describe una medida para arreglo Schlumberger utilizando un equipo constituido por un potenciómetro y un convertidor de corriente; la parte inicial del proceso es semejante a otros sondeos, se proporciona a los peones una cuerda en donde van marcadas las sucesivas posiciones de los electrodos A y B, ya que los electrodos M y N debe-

rán desplazarse con otra frecuencia, se realiza la instalación del equipo, se conectan los electrodos M y N a los carretes y estos a su vez al potenciómetro, los electrodos de emisión se conectan por medio de sus carretes a la fuente de energía en este caso al convertidor.

Se realiza el ajuste de cero del aparato y se procede a efectuar la compensación de las tensiones parásitas que se encuentran en los electrodos de potencial; tan pronto como se ha efectuado, se cierra el circuito de emisión y se procede a realizar las medidas de $V_e I$ de la primera estación, después de esto los obreros desplazan los electrodos A y B a las demás estaciones. En cada estación debe compensarse la tensión entre los electrodos M y N y realizar la medición lo más rápidamente posible; después de cada lectura deberán verificarse las tensiones parásitas, si éstas han variado notablemente, se deberá repetir la lectura, una vez que se haya compensado la polarización espontánea.

Cuando se está utilizando dispositivo Schlumberger, los valores de V disminuyen rápidamente de estación a estación, cuando el operador prevea que la siguiente lectura va a resultar difícil, se procede a la operación de empalme, es decir, el paso a un valor mayor de MN. Generalmente la distancia $4N \text{ AB}/5$.

c).- Comprobación de las medidas y trazo de la curva en el campo.- Se debe ir comprobando la calidad de los resultados por lo que se debe calcular y dibujar la curva de resistividades aparentes que las expresa, si la curva presenta saltos o irregularidades, se repiten las estaciones correspondientes procurando eliminar las causas de la irregularidad; esto es, realizar pruebas de fuga, compensación de tensiones parásitas, correcta colocación de los electrodos, buen estado de cables, calibración del instrumento de medida y tomar nota del material en que se hayan clavado los electrodos. La comprobación de las pruebas de fugas deberá realizarse periódicamente; en tiempo húmedo y terreno cubierto de barro se efectúa varias veces en cada sondeo.

d).- Observaciones durante la medición y tipo de registro.- La correcta anotación de las observaciones de campo es uno de los factores que más influyen en la calidad de los resultados finales. Las lecturas de los instrumentos deben ser registrados fielmente, es necesario que el operador anote todos los factores que puedan influir en la medición, como estado y anomalías del equipo, pruebas de fuga, estabilidad de la compensación, estado del tiempo, estado y naturaleza del suelo, accidentes topográficos, caminos, líneas eléctricas, --

etc., que hayan sido atravesadas por los electrodos de corriente. También son muy importantes los datos geológicos, tales como naturaleza del recubrimiento y acarrees, afloramientos próximos, etc.

Las Figuras Nos. 8 y 9 reproducen una hoja para registro de campo para dispositivo Schlumberger y Wenner respectivamente.

e).- Sondeos de prueba y correlación.- Cuando en una zona por investigar se desconocen por completo las resistividades, es conveniente realizar algunos sondeos de prueba, para conocer los rangos de variación de la resistividad así como el número de medidas a realizar por cada sondeo. Si en la zona de estudio o en áreas adyacentes existen perforaciones profundas, es conveniente efectuar en cada pozo sondeos en cruz, es decir investigar el mismo punto con los azimutes del cuadripolo perpendiculares, lo anterior se realiza para calibración posterior de las medidas con los resultados de la perforación.

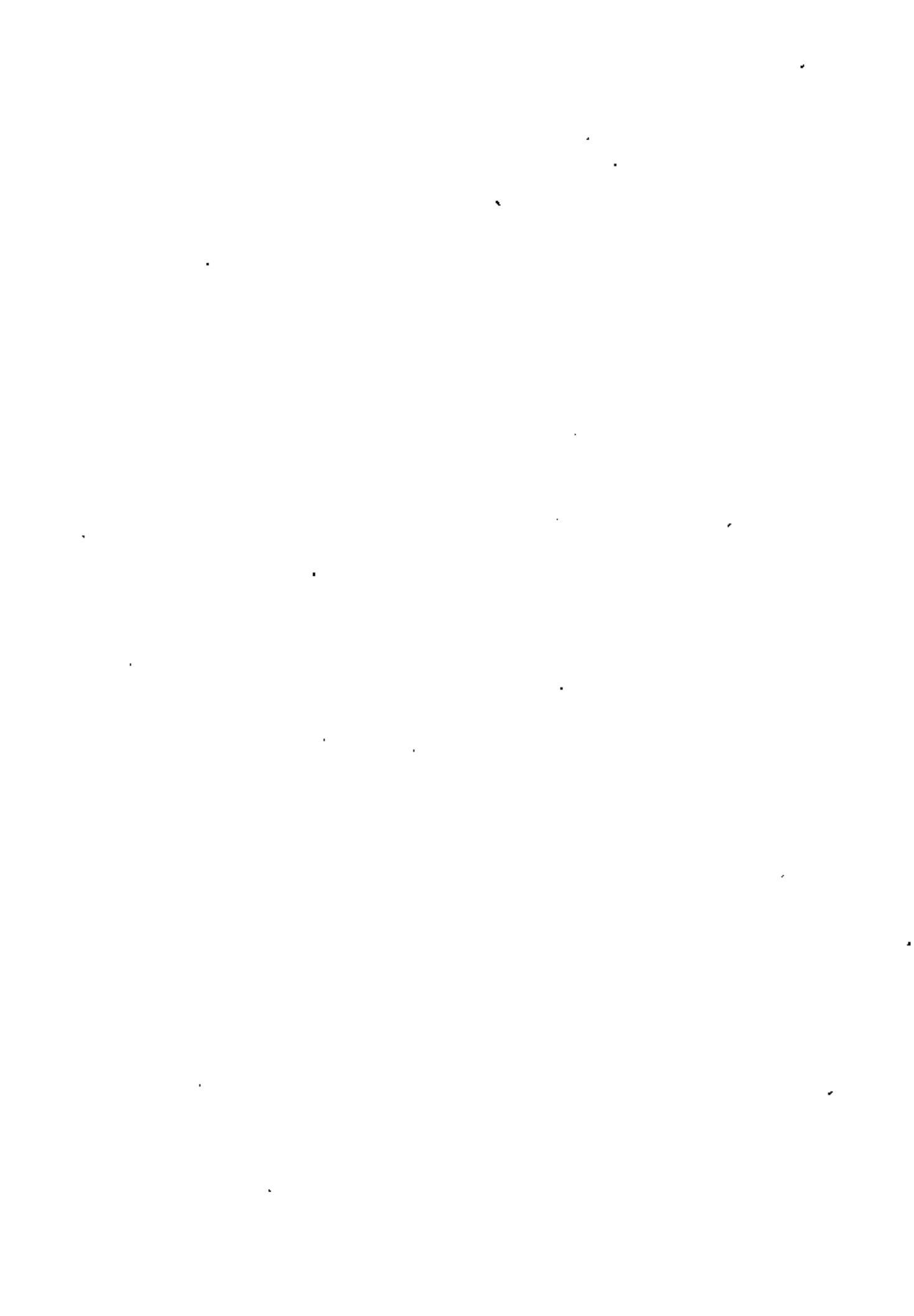
f).- Separación de sondeos y promedio de medidas.- Las separaciones más comunes entre centros de cada sondeo es de 400 a 500 m, pero esto depende del detalle que se desee obtener.

El promedio de medidas en la exploración geoelectrica es importante desde el punto de vista económico, pero depende de factores tan esenciales como la práctica y experiencia del personal y de las condiciones imperantes en la zona de estudio, sobre todo hacia las áreas donde se desplazarán los electrodos, ya que una zona poco accesible permite un avance lento del dispositivo AMNB. También depende de la longitud final de la línea AB y del desplazamiento entre los centros de cada sondeo.

El rendimiento diario promedio es de 4 sondeos con 22 estaciones cada uno, cuando la separación entre sondeos sea de 500 m y las longitudes de las líneas de emisión queden comprendidas entre 800 y 1,200 m, es decir se deberán realizar entre 80 y 100 medidas de resistividad diarias. Conforme se vaya adquiriendo destreza en la operación del equipo y experiencia deberá aumentar el promedio de medidas diarias.

IV.2.4.- Interpretación

Después de obtener la información de campo y las medidas resistivas se lleva a cabo la interpretación de resultados tanto cualitativa como cuantitativamente; en el primer caso para determinar un esquema de la distribución de la corriente en



ESTACION N°		AZIMUT		S. E.			OBSERVACIONES
PUNTO		N. M.		J	M	A	
OA	MM	K	ΔV	I	ρ		
1							
15							
2							
3							
4	2	1.76					
5	2	3.27					
7	2	7.34					
10	2	13.55					
15	5	3.89					
15	5	13.75					
20	5	24.71					
20	5	34.7					
40	5	100.1					
50	5	156.7					
50	20	37.7					
70	5	307.5					
70	20	75.4					
100	20	155.5					
150	20	257					
200	20	427					
300	20	150.8					
300	20	1412					
300	30	207					
400	20	2110					
400	30	427					
500	20	3923					
500	30	975					

Fig. 8 Schlumberger

Proyecto _____

Perfil _____

SEV. N° _____

ρ	I (mA)	V (mV)	K	ρ_a
1			6.3	
2			12.5	
3			18.8	
4			25.5	
6			37.5	
8			50.0	
10			62.5	
12			75.0	
16			100.0	
20			125.5	
24			150.0	
32			200.0	
40			250.0	
48			300.0	
56			351.6	
64			402.0	
72			452.0	
80			500.0	
100			628.0	
120			754.0	

Observaciones. —

Fig. 9 Wenner

el subsuelo y en el segundo caso para definir la posición, espesor y profundidad de aquellas zonas que presentan variaciones o anomalías resistivas.

La interpretación normalmente se hace en función de valores de resistividad pero si se tiene información geológica de superficie y del subsuelo, entonces estos datos ayudan a calibrar las medidas y correlacionar conjuntamente la información permitiendo obtener perfiles de resultados con sus características geofísicas y geológicas. A continuación se describen estos procedimientos.

Interpretación Cualitativa

Este tipo de interpretación permite establecer conceptualmente las irregularidades del terreno en función de la distribución de la corriente en el subsuelo; para tal fin se lleva a cabo el procesamiento de los valores resistivos y elaboración de varios tipos de curvas. El procesamiento incluye:

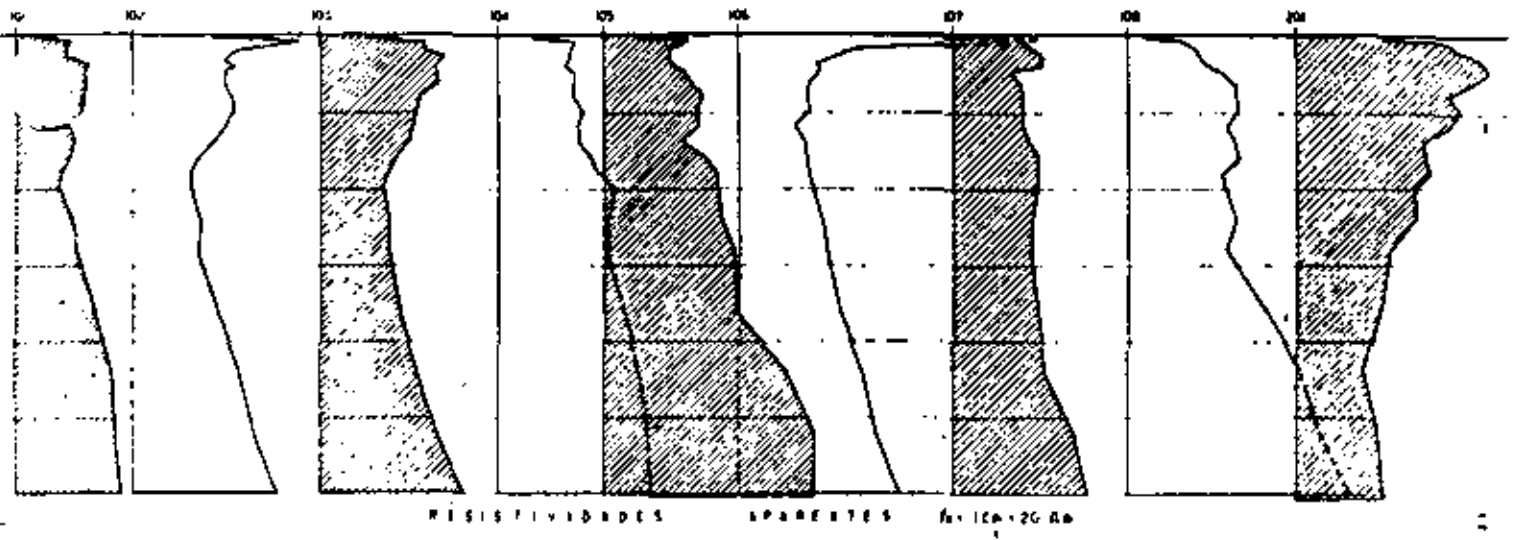
- a).- Verificación de las resistividades aparentes.
- b).- Elaboración de curvas de resistividad aparente-distancia de emisión.
- c).- Elaboración del perfil de curvas de isorresistividad.
- d).- Elaboración del perfil de resistividad aparente-distancia de emisión constante.
- e).- Mapa de isorresistividad aparente con distancia de emisión constante.

a).- Verificación de las resistividades aparentes.- Esta operación consiste en una verificación de los valores de resistividad calculados en el campo y la transferencia de dichos valores en una tabla para obtener un conjunto de todas las medidas según el número de sondeos y separación de los electrodos. Cuando se utilizan arreglos tipo Schlumberger es necesario además realizar correcciones de los valores en los puntos necesarios del sondeo hasta donde se encuentre otro emplazamiento.

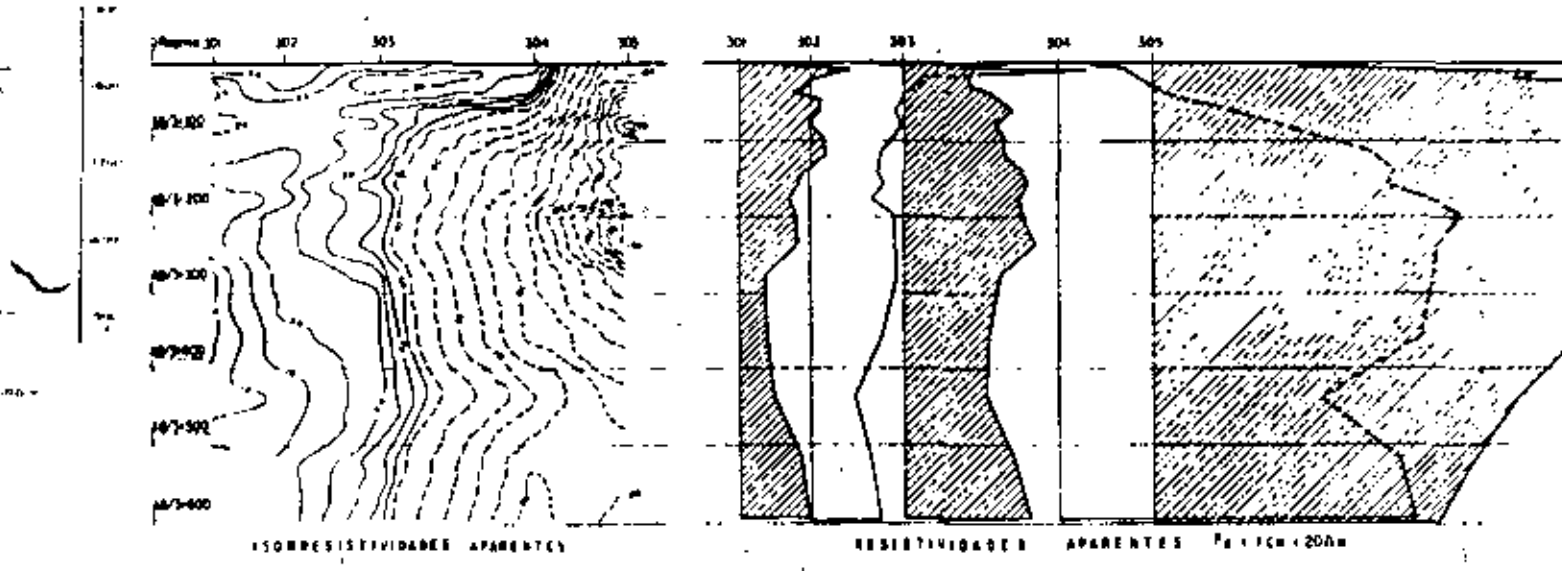
b).- Elaboración de curvas de resistividad aparente-distancia de emisión.- Estas curvas se trazan en coordenadas cartesianas en la cual las ordenadas corresponden a la distancia de emisión y las abscisas a la resistividad aparente. Cada una de estas curvas se ordenan o acomodan a escala bajo una alineación determinada, obteniéndose un esquema de conjunto que permite observar las variaciones de resistividad para cada distancia de emisión y consecuentemente definir la continuidad o discontinuidad de un horizonte. En la Figura No. 10 se ---



P E R F I L N° 1



P E R F I L



P E R F I L N° 4

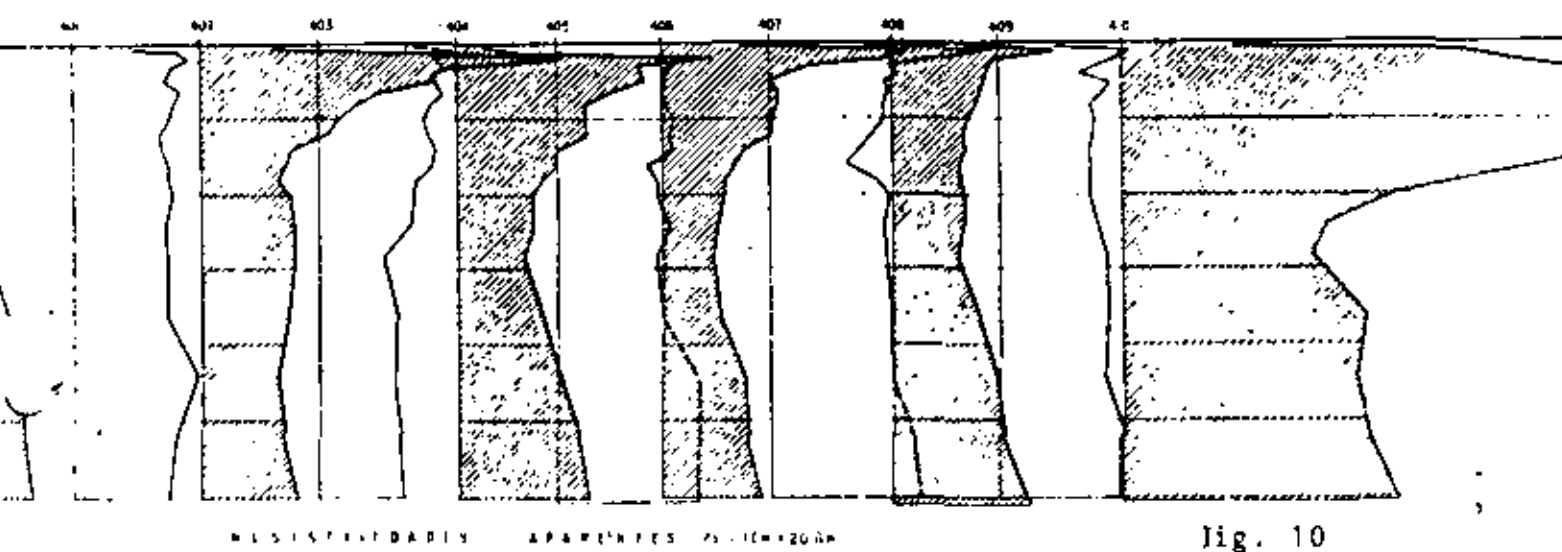


Fig. 10



muestra un ejemplo de esta curva, en la cual la escala vertical es de 1:4,000 y en la horizontal 1 cm corresponde a un valor de la resistividad equivalente a 40 Ω m.

c).- Elaboración del perfil de curvas de isorresistividad. Estas curvas se construyen debajo de un perfil del terreno donde quedan alojados varios sondeos alineados; en este perfil se marcan los valores de resistividades aparentes bajo cada punto de emisión para realizar una configuración de puntos de igual resistividad. Las curvas de isorresistividad permiten mostrar un esquema general de la distribución de la corriente en el subsuelo, proporcionando información sobre zonas con variaciones, discontinuidad o anomalías resistivas, o en su caso zonas homogéneas o continuas que dan una idea de las condiciones estructurales que prevalecen en el terreno investigado. La figura No. 11 a muestra un esquema de isorresistividad en la que se observa que se trata de un terreno no homogéneo.

d).- Perfil de resistividad aparente-distancia de emisión constante.- Cuando se trata de definir la continuidad de un horizonte determinado en forma más detallada, se hacen lecturas a una distancia de emisión constante y los puntos de observación también a distancias constantes (Fig. 12).

Interpretación Cuantitativa

La interpretación cuantitativa tiene por objeto determinar las resistividades reales del terreno y la posición en el subsuelo de las zonas que muestren interés en el estudio geohidrológico, esto es zonas que presentan cambios de resistividad notables o presencia de anomalías; en zonas donde no existen diferencias notables en las resistividades, el método de resistividad pierde un poco de eficacia. El cálculo de las resistividades reales y la profundidad a la que se encuentran, se puede determinar analíticamente por ello representaría un trabajo muy laborioso, por lo que en la práctica lo más usual es utilizar tablas y curvas maestras previamente calculadas que facilitan la interpretación. El procesamiento en este caso incluye:

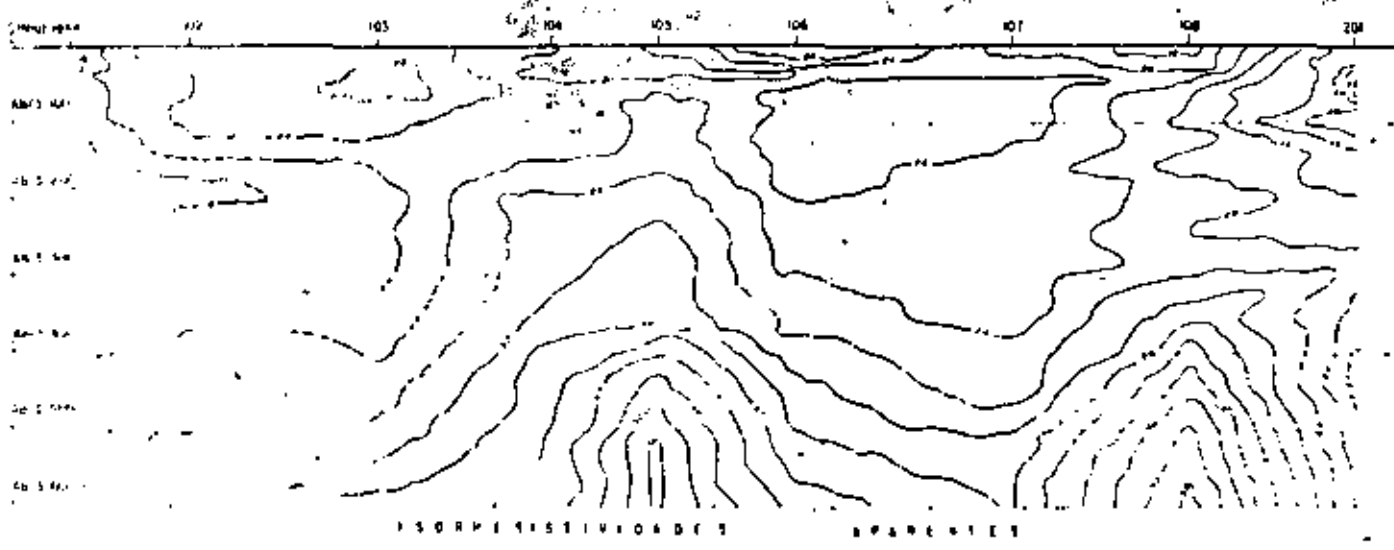
- a).- Elaboración de la curva resistividad aparente-distancia de emisión en --- coordenadas logarítmicas.
- b).- Clasificación de las curvas.
- c).- Ajuste de las curvas por medio de -- ábacos.
- d).- Elaboración de perfiles de resultados

a).- Elaboración de la curva resistividad aparente--- distancia de emisión en coordenada logarítmicas.- Esta curva se construye con los valores resistivos verificados, colocando -- las resistividades aparentes en las ordenadas y la distancia -

1

1

1



P E R F I L N° 2

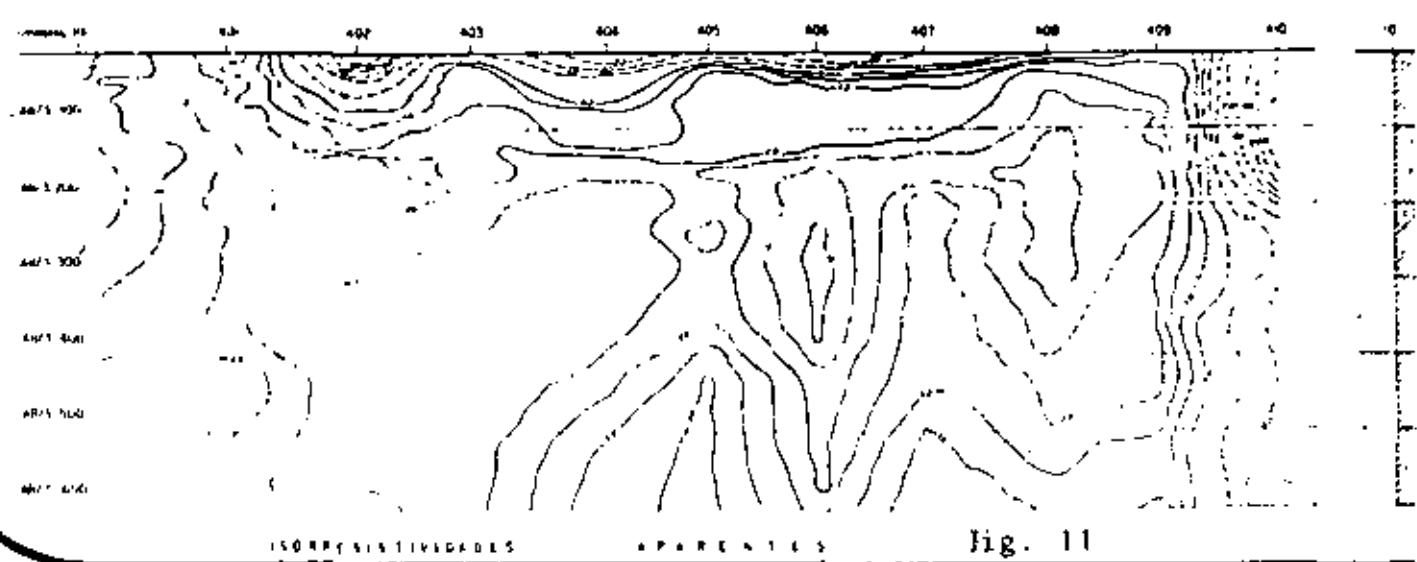
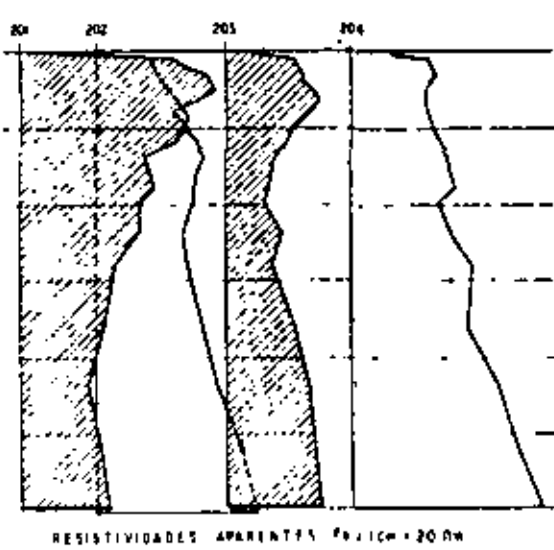
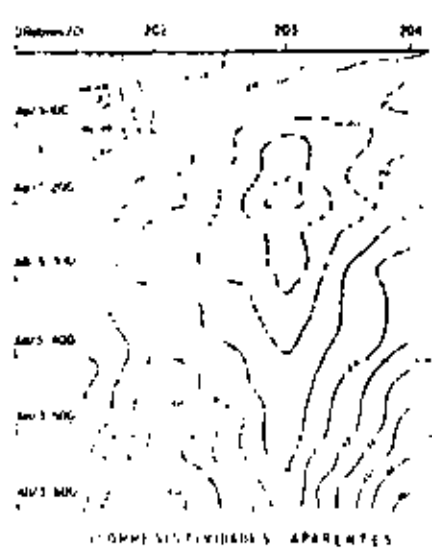
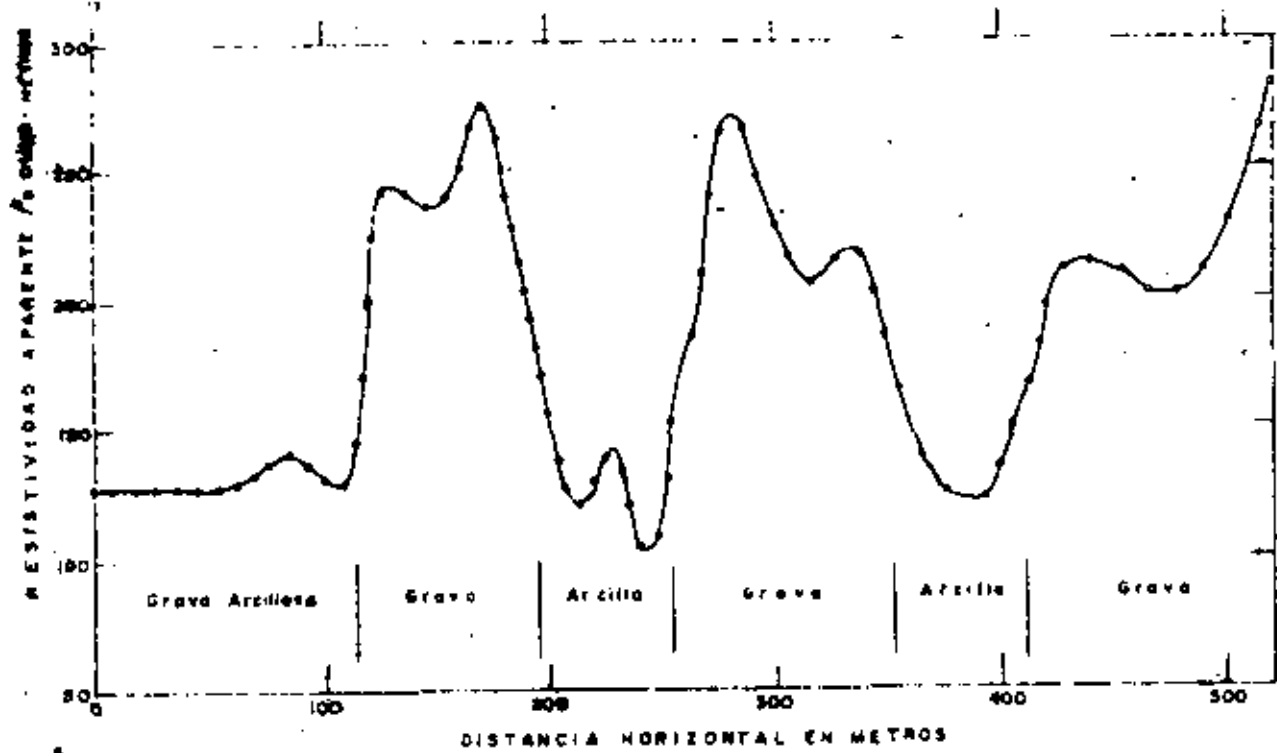


Fig. 11



PERFIL HORIZONTAL E INTERPRETACION SOBRE UN DEPOSITO
DE GRAVA USANDO ARREGLO WENNER $a = 0.15$ m

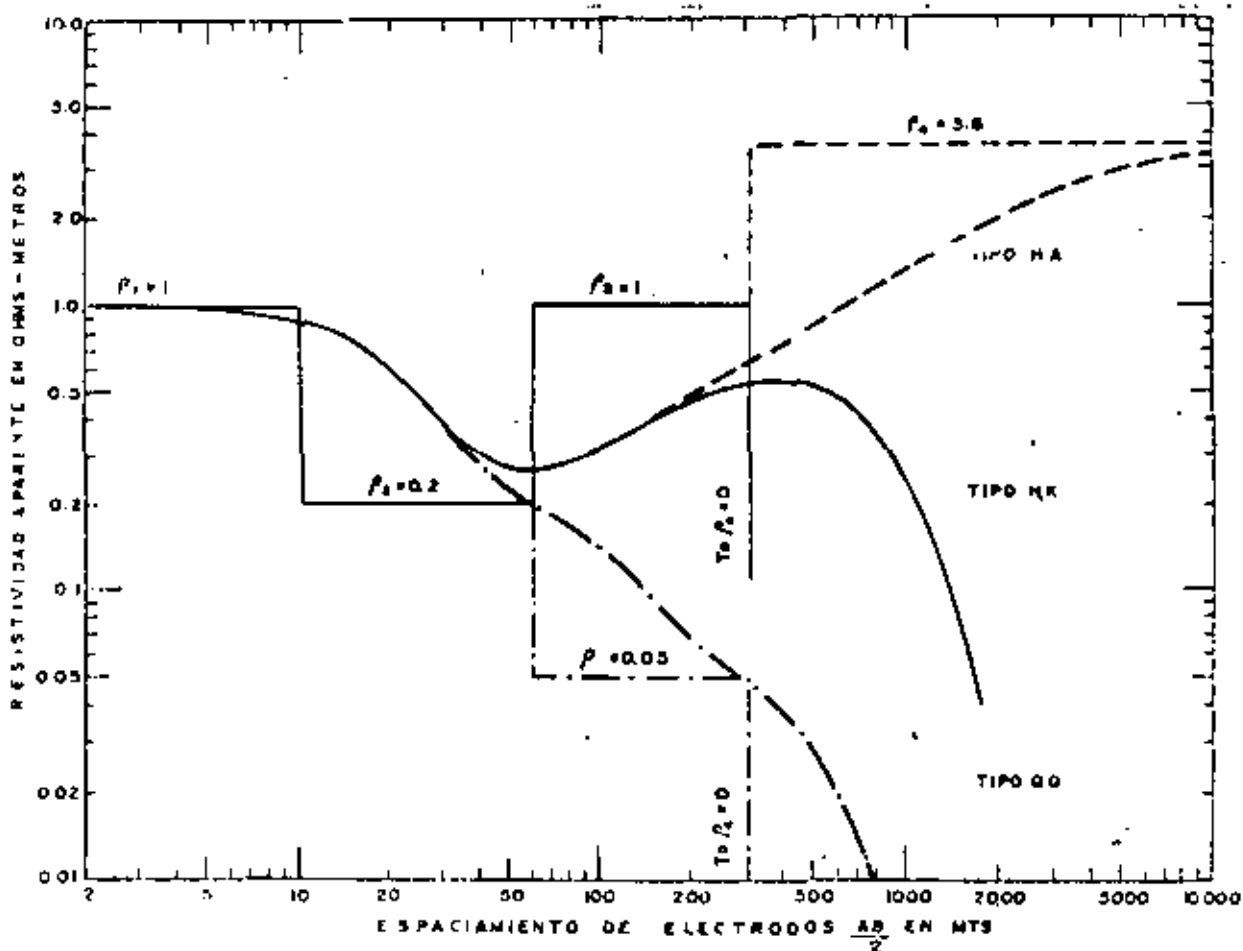
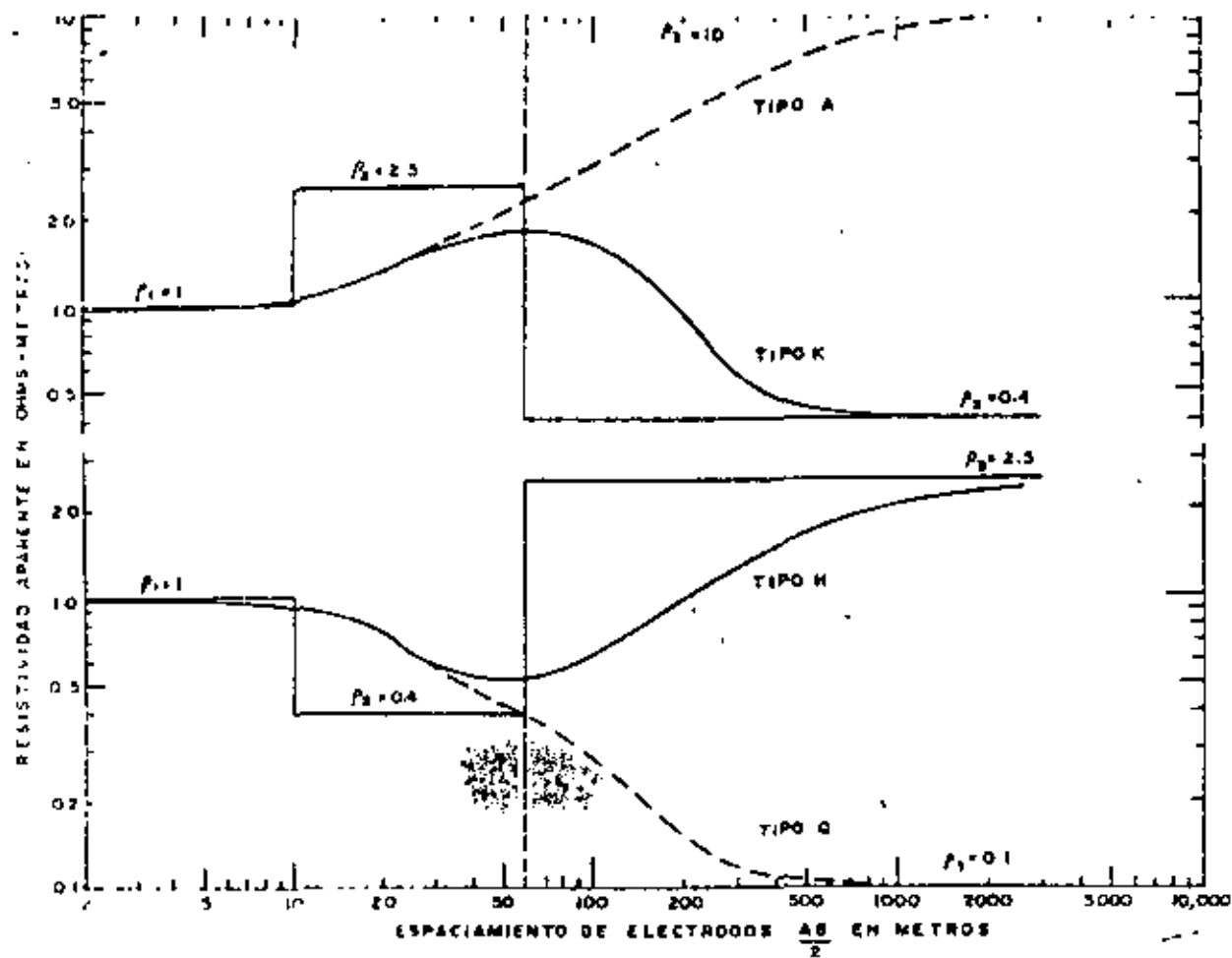


Fig. 13

de emisión AB/2 o AB/3, en las abscisas de un papel logarítmico cuyo formato, generalmente con módulos de 10 cm. debe ser igual al de las curvas maestras

b).- Clasificación de las curvas.- Una vez trazadas todas las curvas de los sondeos, se hace la clasificación de ellas según su forma agrupándolas en familias de tal manera que faciliten su interpretación, identificándose con las curvas maestras.

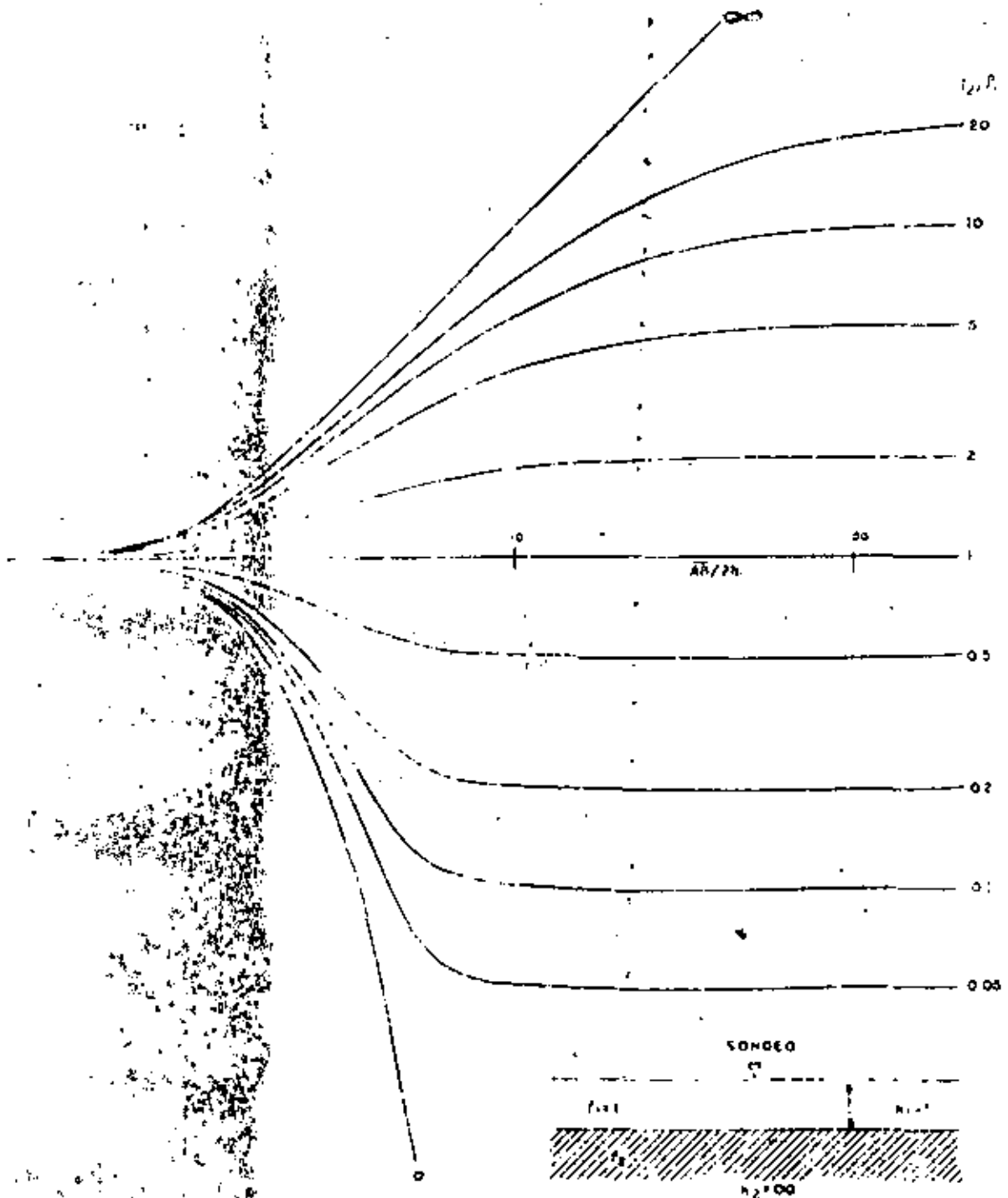
Las curvas maestras son curvas que se han trazado con valores resistivos teóricos en condiciones ideales para cada tipo de estructura del terreno, aunque generalmente se refieren a medios horizontales estratificados. Existen catálogos de curvas según el tipo de dispositivos que se utilicen tanto para Wenner como para Schlumberger, o también se pueden construir para cualquier otro tipo de arreglo.

En la práctica las curvas se clasifican como H, A, K y Q. Según las relaciones que existan entre los diversos rangos de resistividades. Con esta clasificación se pueden hacer todas las combinaciones según la relación de resistividades. La Figura No. 13 muestra una curva de cada tipo.

c).- Ajuste de las curvas por medio de ábacos.- Según el tipo de dispositivo utilizado, el ajuste de curvas por medio de ábacos se hace con el fin de obtener las resistividades reales y el cálculo de profundidad. Esto se hace por medio de superposición de la curva obtenida en el campo con la curva teórica del catálogo, utilizando el método del punto auxiliar o cualquier otro método. En las Figuras Nos. 14, 15 y 16 se muestra un conjunto de curvas de 2 capas para un arreglo eléctrico Schlumberger y los diagramas auxiliares tipo H, A, K, Q respectivamente.

d).- Elaboración de perfiles de resultados.- Una vez calculadas las resistividades reales y las profundidades a las que se encuentran, se construye el perfil de resultados, colocando bajo cada sondeo los contactos notables con sus resistividades reales correspondientes que han sido determinados durante el ajuste de curvas. Posteriormente se correlacionan estos valores según una sección determinada, uniendo los grupos de valores semejantes y determinando la continuidad de los horizontes. En caso de que los valores no sean correlacionables esto indicará que en el subsuelo existirá una discontinuidad que puede ser debida a cambios en la naturaleza del material, cambio en la estratigrafía o presencia de algún accidente de tipo tectónico. En todo caso el perfil de resultados presenta una imagen de la estructura del subsuelo basada únicamente en valores de resistividad. La Figura No. 17 muestra un esquema de este tipo de información obtenida.





CONJUNTO DE CURVAS MAESTRAS PARA SONDEOS ELECTRICOS DE 2 CAPAS
(Arreglo SCHLUMBERGER)

Fig. 14



GRAFICO AUXILIAR (TIPO-A)

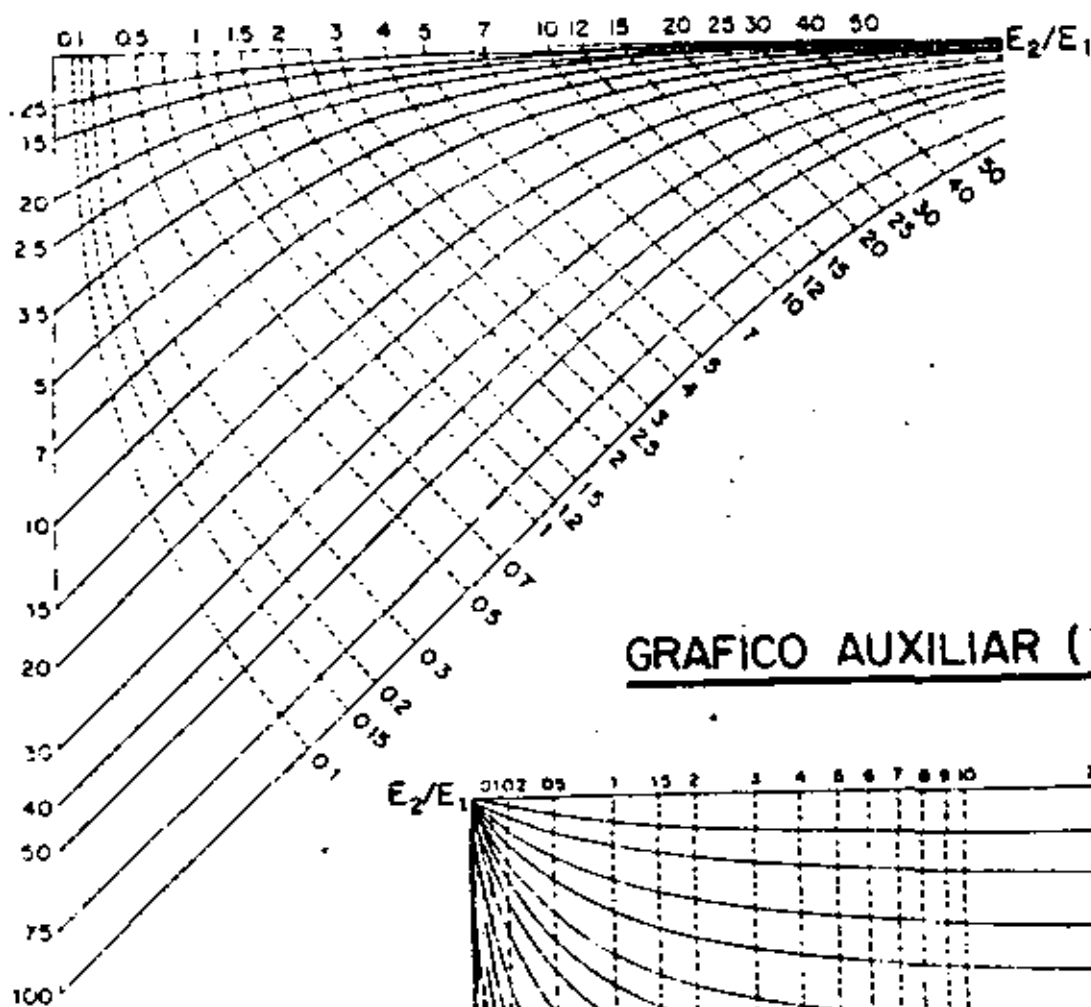


GRAFICO AUXILIAR (TIPO-H)

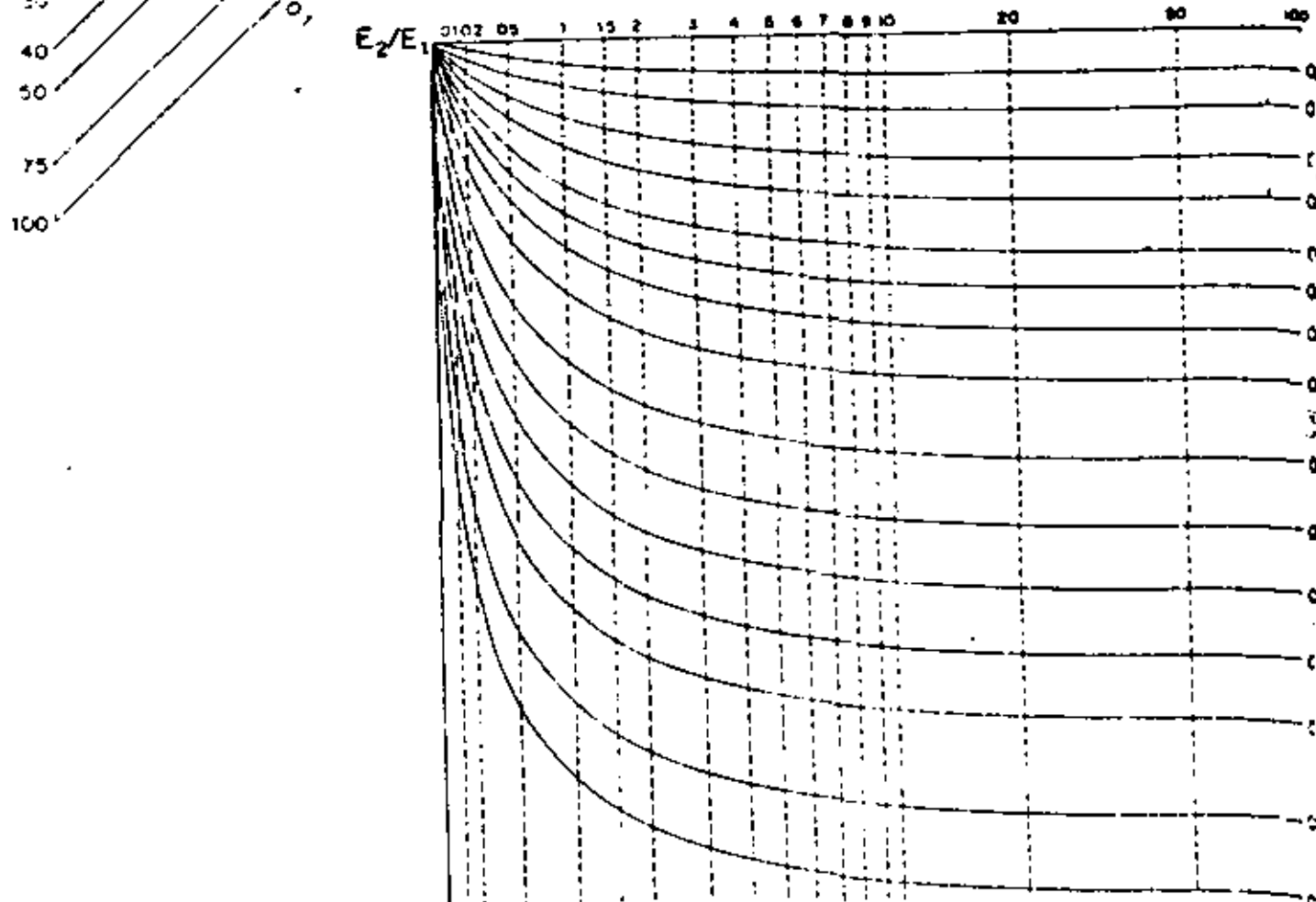


Fig. 15

GRAFICO AUXILIAR (TIPO-K)

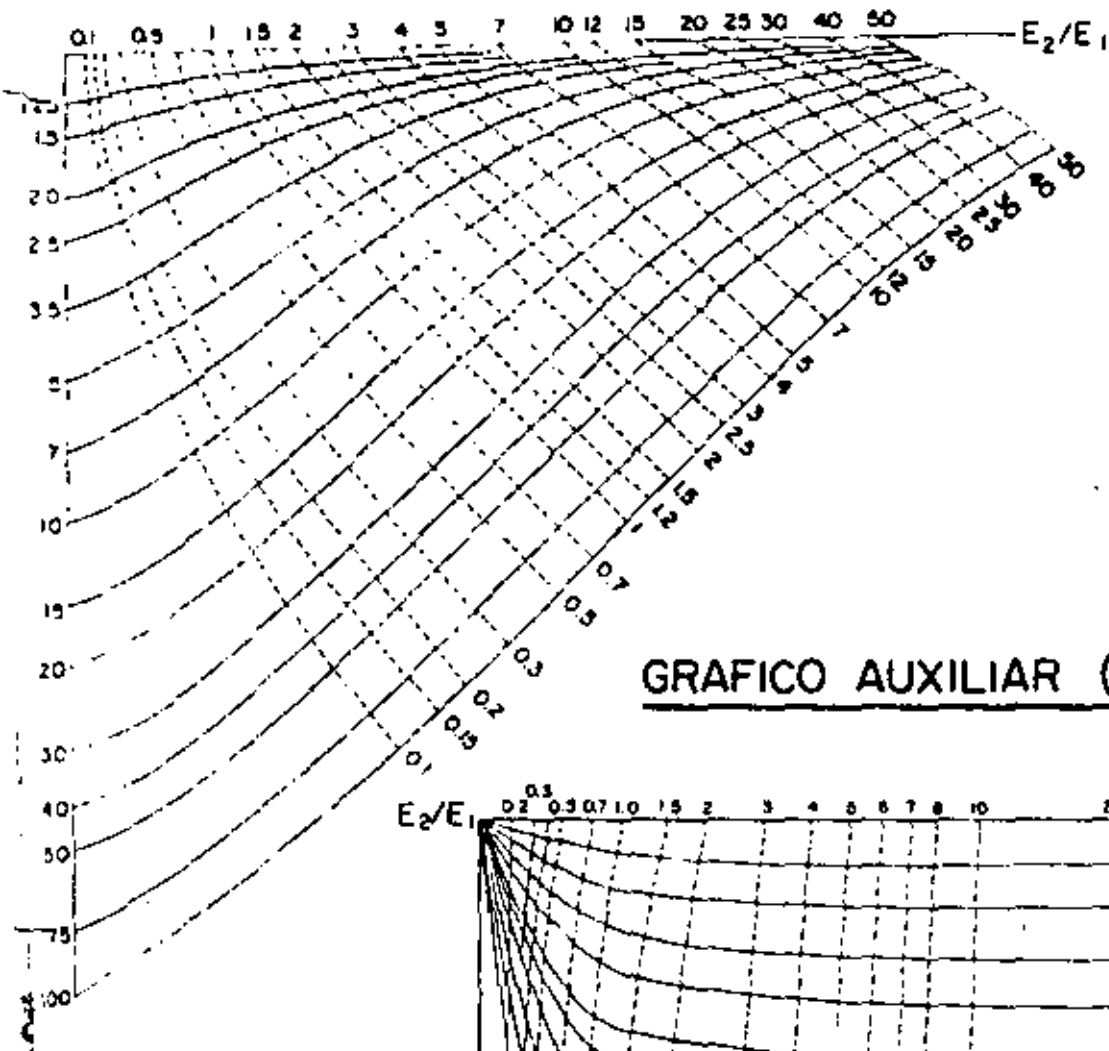


GRAFICO AUXILIAR (TIPO-Q)

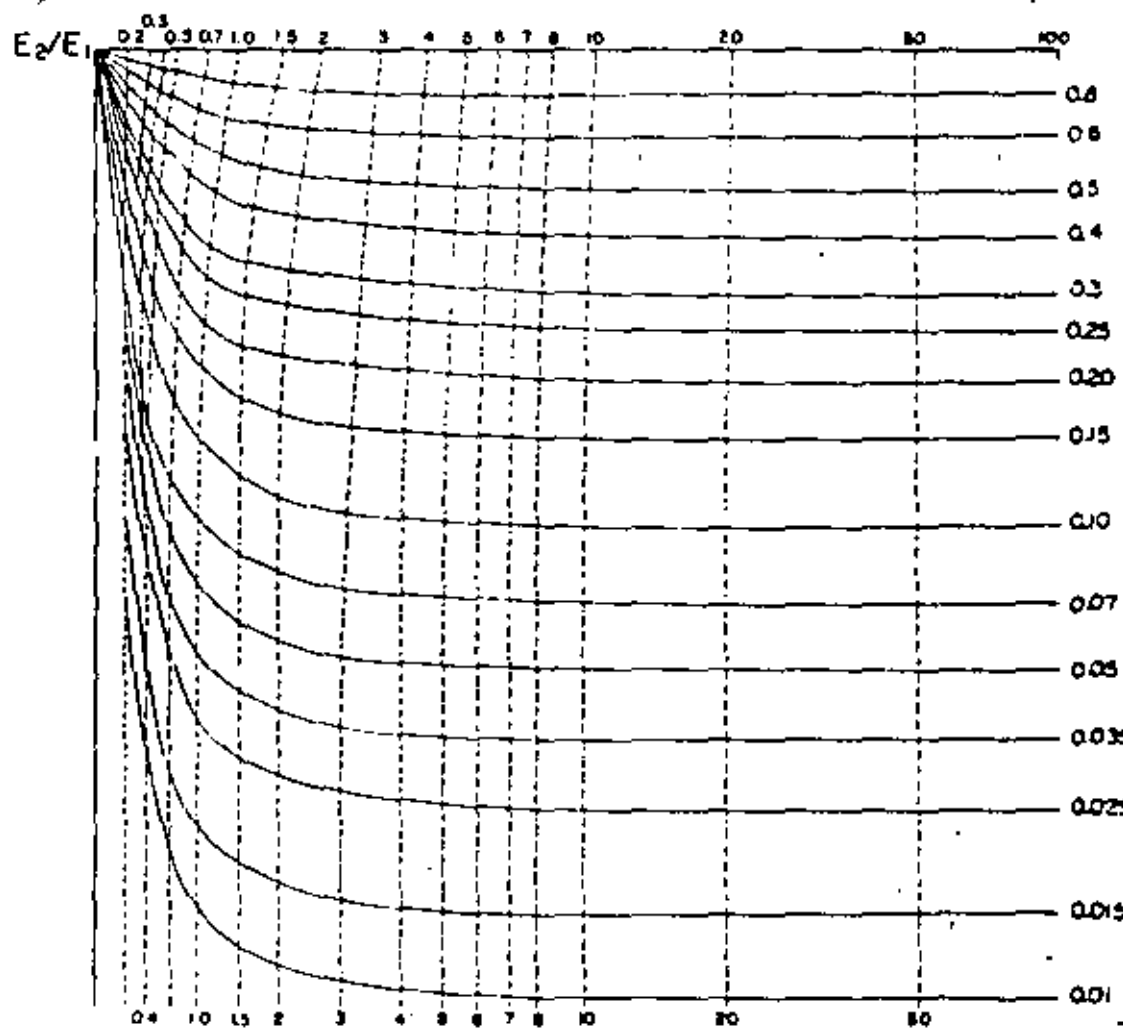
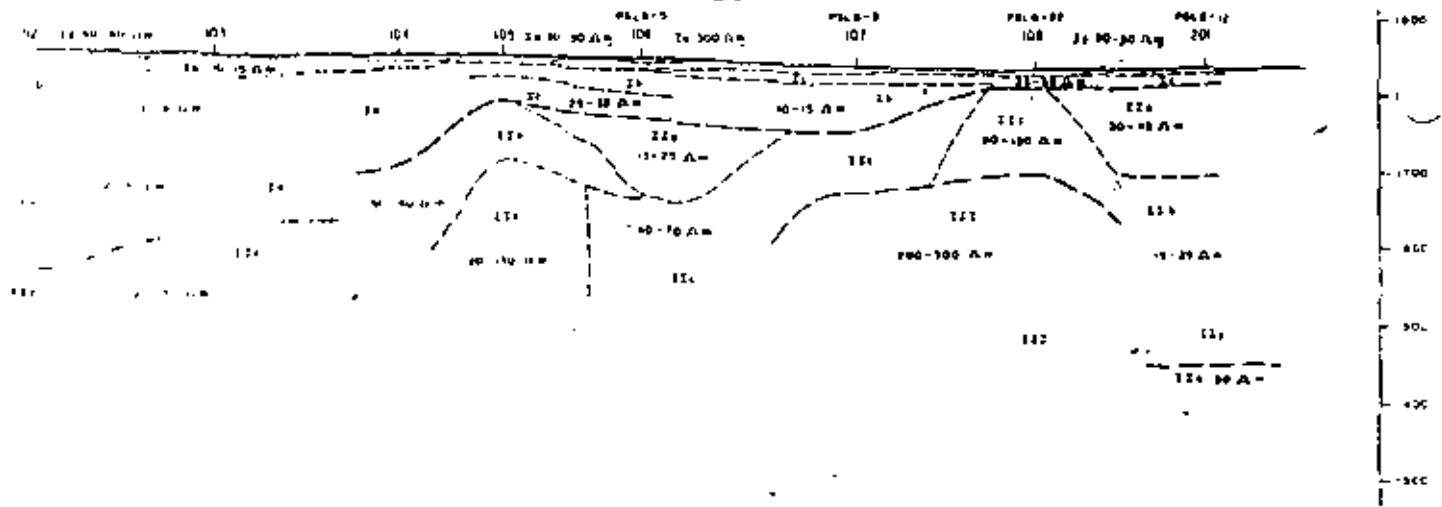
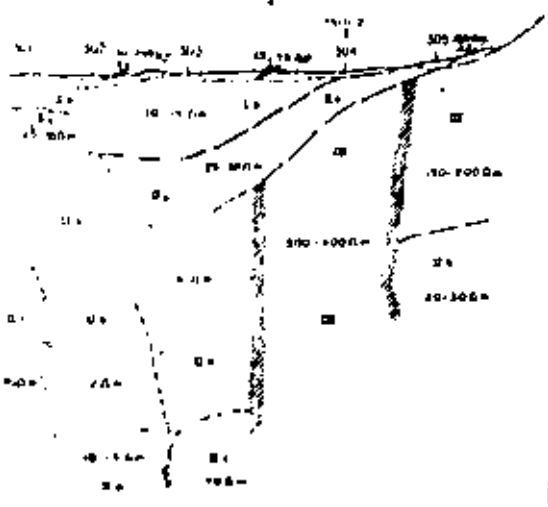


Fig. 16



3



EXPLICACION

ZONA	UNIDAD	VALORES DE RESISTIVIDAD	CORRELACION PROBABLE
SUPERIOR	Ia	10-15, 20-30, 30-40, 40-50, 50-70, 80-100, 100-150, 150-200, 200-400, 400, 700-800 Δm	Capas de areniscas y arcillas
	Ib	5-8, 10-15, 15-25, 30-35 Δm	Gruesa capa de arena y arcillas
	Ic	15-20 y 25-35 Δm	Gruesa areniscas gruesas y arcillas
INTERMEDIA	IIa	20-25, 30-35, 40-50 y 75 Δm	Capas areniscas gruesas y arcillas
	IIb	25, 10-15, 15-25, 30-40 Δm	Capas de arena gruesa y arcillas
	IIc	40-75, 80-100 y 120-130 Δm	Areniscas de arena y arcillas
PROFUNDA	IIIe	40-50, 50-70, 100-150 y 300-400 Δm	Capas areniscas gruesas y arcillas

ESCALA HORIZONTAL 1:100,000
 ESCALA VERTICAL 1:10,000

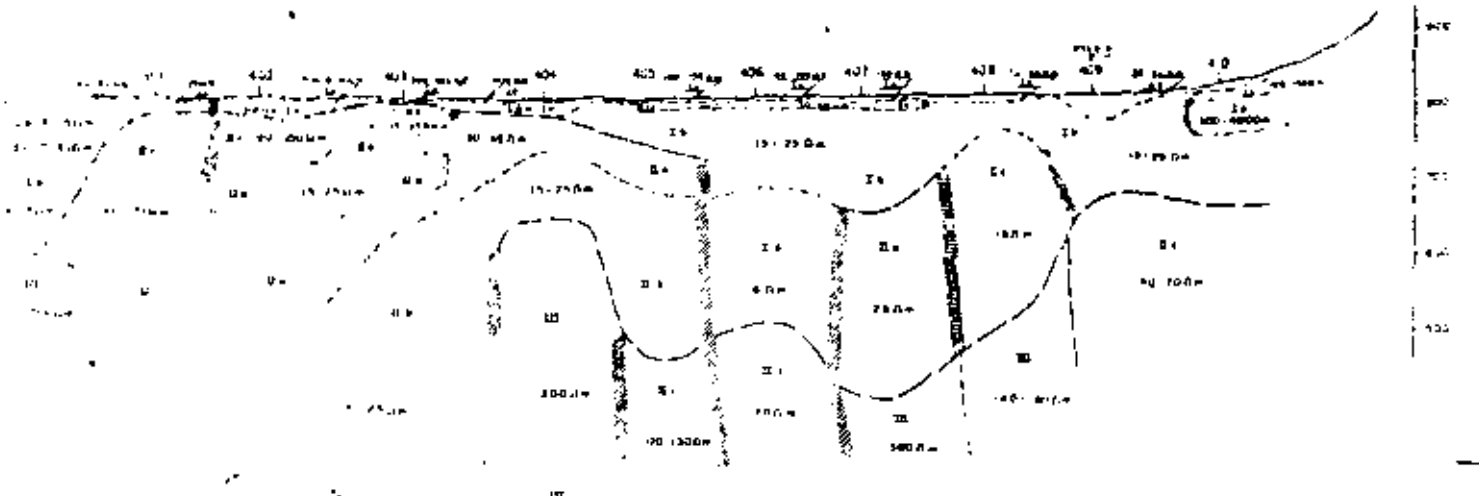


Fig. 17



IV.2.5.- Correlación de Medidas con Datos Geológicos

La interpretación de medidas resistivas por sí sola, únicamente permite obtener resultados en cuanto a las características eléctricas del terreno, por lo que es necesario calibrar y correlacionar dichas medidas con información geológica de la superficie y del subsuelo obtenida durante el reconocimiento de campo.

En el caso de manejar información de superficie, la correlación de las primeras medidas de los sondeos obviamente se hará con los materiales que afloran, sea cobertura intemperizada, rellenos aluviales superficiales u otro tipo de roca, mientras que los valores más profundos deberán ser relacionados con materiales que de acuerdo con los procesos geológicos se espera existan en el subsuelo, considerando las condiciones de sedimentación, de estructura, de geomorfología, o procesos tectónicos de deformación o roturas de las rocas. Estas características geológicas permiten establecer algunas ideas sobre el comportamiento geohidrológico de la zona de estudio.

La información del subsuelo se tiene cuando en la zona de trabajo existen pozos, debiendo hacerse sondeos cercanos a dichos pozos, de manera que los cortes geológicos y registros eléctricos se puedan correlacionar con los valores de la resistividad medida y propagar hacia otros sitios que presenten condiciones eléctricas similares o análogas, con lo que estará en posibilidad de definir con más precisión los diferentes cuerpos acuíferos.

Podría también extrapolarse otro tipo de información geohidrológica obtenida de los pozos existentes, aunque esto está fuera de la geofísica eléctrica, en lo que se refiere a caudales, piezometría, transmisibilidad y calidad de agua, factores todos que intervienen en un trabajo integral de geohidrología.

Cuando no se tienen perforaciones, entonces se recomienda que se hagan en aquellos sitios donde la interpretación geofísica indique que ellos puedan proporcionar mejores resultados.





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



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

LOCALIZACION

ING. LUIS LARA TRUJILLO

OCTUBRE, 1980



REGISTRO DE REGISTROS EN
POZOS DE AGUA.

Introducción.- Los registros de pozos representan en la actualidad el método seguro y conveniente para la obtención de datos de subsuelo, al efectuarse la perforación de pozos que tienen como objetivo la localización de hidrocarburos, agua ó minerales. En general puede decirse que de acuerdo con la cantidad de información requerida así como su confiabilidad y costo, existen en la tecnología de registros varios tipos de métodos y herramientas, siendo en algunos casos necesario utilizar computadoras no solamente por la rapidez de obtención de resultados sino por lo complejo y/o rutinario de los procedimientos de cálculo.

Las características ó propiedades físicas de las rocas, son de importancia básica para los distintos tipos de registros que existen: cuándo están parcial ó totalmente saturadas de agua, se aprovechan sus propiedades eléctricas; sus propiedades radiactivas ya sea en forma natural ó inducida por bombardeo de neutrones; sus propiedades de propagación de ondas acústicas; y su densidad y conductividad termal.

Atendiendo a razones de costo, los programas de registros en pozos de agua, se configuran sobre la base de un registro eléctrico y en ocasiones la curva de rayos gamma. La información obtenida a partir de éstos registros es complementada por el conocimiento geológico del área, muestras litológicas, observaciones sobre la perforación y cierta experiencia.

Con el objeto de lograr el aprovechamiento adecuado de los registros tomados en la perforación de pozos de agua, se describirán los métodos comunes, sus principios e interpretación de resultados.

Registro eléctrico. - Para nuestros propósitos, puede considerarse que un registro eléctrico es la gráfica de ciertas propiedades eléctricas de las rocas atravesadas por un pozo. Tales propiedades son medidas por dos ó más configuraciones de electrodos los cuales son bajados dentro del pozo por medio de cables eléctricos. Generalmente el registro eléctrico presenta dos gráficas diferentes: en la parte izquierda aparece el potencial espontáneo

también llamado SP, mientras que las mediciones registradas de la resistividad están en la porción derecha. Tanto el potencial natural como las resistividades, son registradas simultáneamente en una sola "corrida" ó viaje del instrumento.

Las mediciones de los parámetros mencionados, solo pueden efectuarse en los pozos que no tienen adame ó tubería de revestimiento y que estén llenos de un fluido conductor.

El procedimiento para obtener el registro eléctrico consiste en bajar un sistema de electrodos sobre un cable multiconductor aislado, hasta el fondo del pozo y al subirlo a la superficie ir registrando de acuerdo a la profundidad, las lecturas correspondientes a los parámetros medidos, sobre un papel con las escalas convenientes.

Potencial espontáneo.- La curva del potencial espontáneo, es el registro de los potenciales naturales que se generan en el pozo, siendo la representación de las diferencias de potencial que existe entre un electrodo colocado en la superficie y otro que se introduce al pozo.

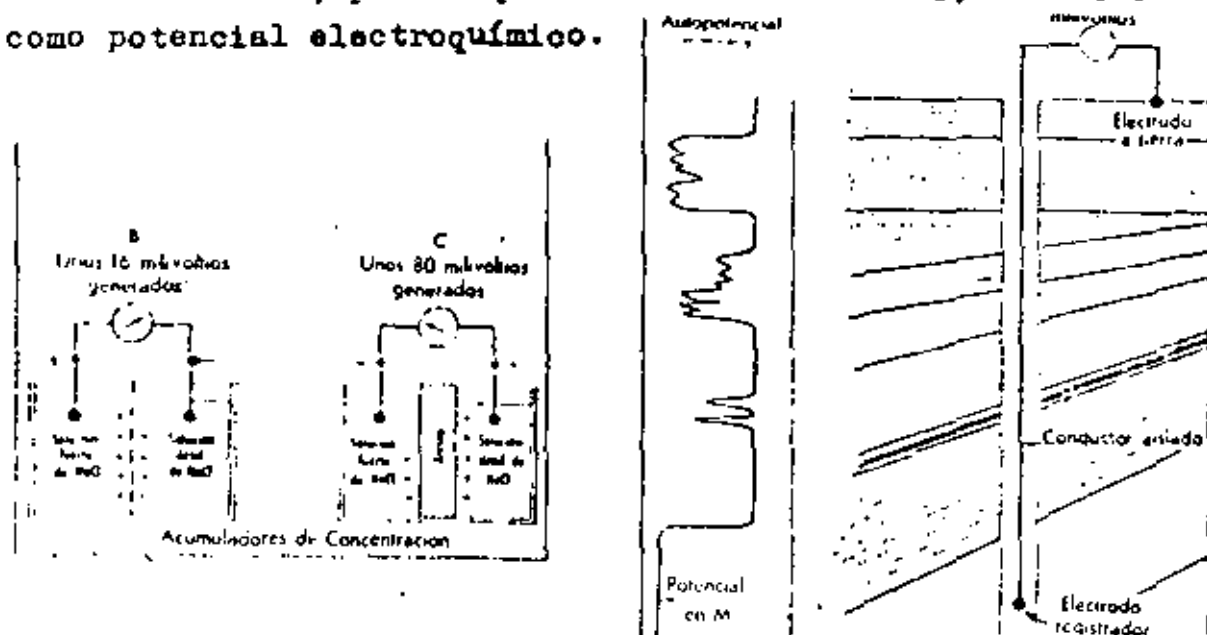
El potencial espontáneo es obtenido simultáneamente a otros registros. Las variaciones de la curva reflejan las diferencias de potencial entre puntos dentro del agujero frente a rocas porosas y puntos frente a cuerpos arcillosos. Cuando las rocas atravesadas están constituidas por capas de arcilla ó lutita, se observa que tienen aproximadamente el mismo potencial, lo cual provoca que en la curva del potencial espontáneo aparezca casi una línea recta vertical, llamada "línea base de lutitas". A partir de ésta línea base se miden las deflexiones de la curva ocasionadas por las otras rocas.

Generalmente la curva del potencial espontáneo permite obtener la siguiente información:

- 1.- El límite de capas y su espesor efectivo.
- 2.- Determinar en forma aproximada la resistividad -- (ó bien la salinidad) del agua contenida en la roca.
- 3.- Correlación de capas.

Experimentalmente se ha logrado demostrar que las principales fuentes de potencial que originan la curva del SP, son las siguientes: Potencial de difusión ó efecto de la pila de con-

centración, potencial de membrana ó de Nerst y el potencial de electrofiltración ó de corrientes. Los dos primeros son resultados de fenómenos electroquímicos y responsables principales de la curva del SP, por lo que sumando sus efectos, se les conoce como potencial electroquímico.



Los fenómenos electroquímicos que producen la mayor parte del potencial natural, se puede explicar por su analogía con las llamadas pilas de concentración. Estas se forman al contacto de dos soluciones salinas de diferente concentración: los iones Na^+ y Cl^- pueden pasar de una solución a otra. Como los iones de Cl^- tienen mayor movilidad que los iones de Na^+ resulta un flujo de cargas negativas de la solución más concentrada a la menos concentrada. Esto equivale a un flujo de corriente convencional en la dirección opuesta. El fenómeno se reproduce en un pozo en el límite de la zona invadida por el filtrado del lodo de perforación que ha penetrado a la formación y el agua que contiene ésta, produciendo el potencial de concentración.

Cuando una arcilla separa soluciones de NaCl de diferente concentración, los cationes Na^+ se desplazan a través de la arcilla (las arcillas son permeables a los cationes Na^+ e impermeables a los aniones Cl^-), desde la solución más concentrada hacia la menos concentrada. Esta situación se presenta en los pozos cuando se encuentra una formación permeable entre dos cuerpos de arcilla, siendo las soluciones el filtrado del lodo de perforación y el agua intersticial.



El movimiento de iones de Na^+ a través de la arcilla, desarrolla el potencial de membrana.

Tanto el contacto de las dos soluciones representadas por el filtrado del lodo de perforación y el agua contenida en la roca permeable, como la relación de las mismas a través de la arcilla producen la fuerza electromotriz electroquímica total, - que está representada por la siguiente ecuación:

$$E_o = -K \log \frac{a_w}{a_{mf}} \quad (1)$$

en donde:

- E_o = fuerza electromotriz electroquímica.
- a_w = actividad química del agua intersticial.
- a_{mf} = actividad química del filtrado del lodo
- K = coeficiente proporcional a la temperatura absoluta. Para soluciones de NaCl es igual a 71 á 25°C .

Para soluciones de NaCl no demasiado concentradas, las resistividades son inversamente proporcionales a las actividades químicas, por lo que la ecuación anterior se puede escribir:

$$SP = -K \log \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (2)$$

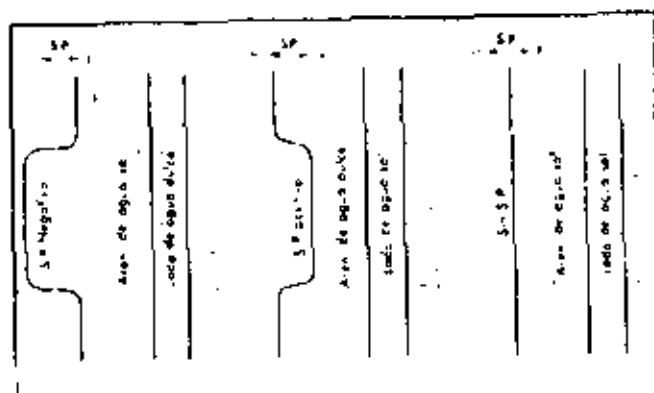
en donde:

- SP = potencial espontáneo obtenido del registro.
- R_{mf} = resistividad del filtrado del lodo.
- R_w = resistividad del agua intersticial.
- K = coeficiente proporcional a la temperatura abs.

Por lo anterior, en algunos casos es factible obtener un valor estimado de R_w (ó la salinidad del agua de formación), aunque teniendo en mente siempre que la fórmula (2) es una aproximación permisible cuando el contraste de salinidades entre el agua de formación y del filtrado del lodo es grande y la formación no contiene arcilla que pudiera reducir la amplitud del SP . En pozos de agua, donde el interés reside en la obtención de la salinidad de aguas útiles, ésta posibilidad se ve muy restringida, por lo que generalmente el uso de la curva del potencial espontáneo, es de tipo cualitativo.

Tomando como referencia, la línea base de lutitas, el potencial espontáneo que es medido en milivolts, puede ser negativo si su deflexión es a la izquierda, positivo si la deflexión es a la derecha de la misma referencia ó bien nó dar ningún valor relativo.

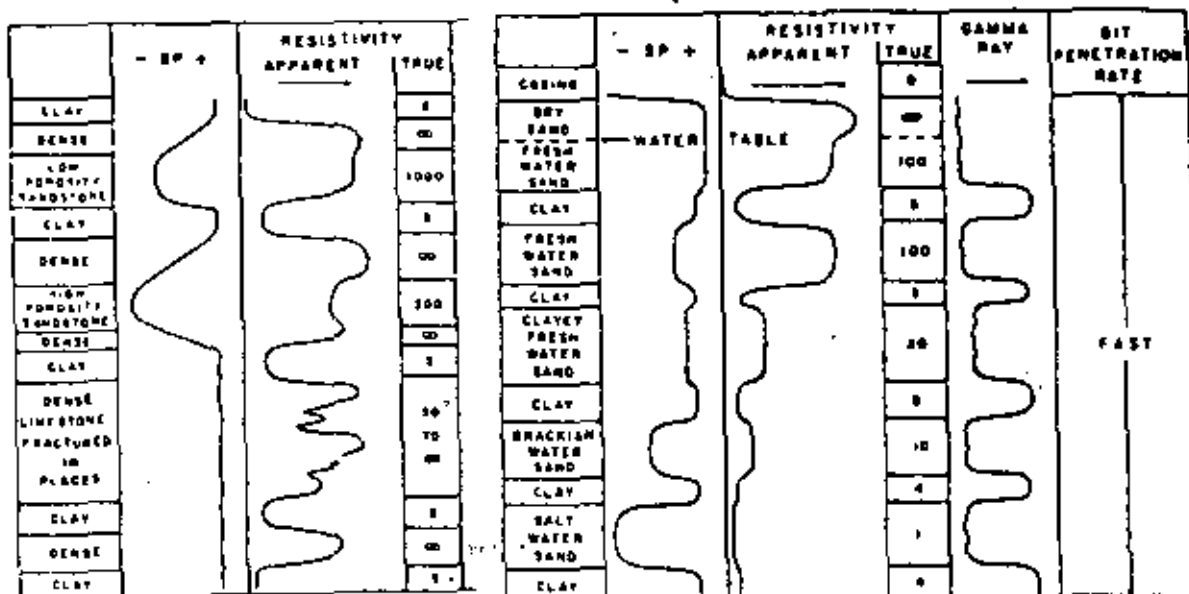
De acuerdo al principio electroquímico que genera los potenciales dentro del pozo, se puede considerar como una regla: si la curva del potencial es negativa, el agua contenida en la roca es más salada que la del lodo de perforación; en cambio si es positiva, el agua intersticial es más dulce que la del lodo y si nó tiene expresión en uno ú otro sentido, el agua intersticial es muy semejante a la del lodo de perforación.



En la práctica, la medición del SP se obtiene mediante un circuito potenciométrico, que es conectado entre un electrodo móvil (M) y un electrodo fijo en la superficie (N). El medidor (R), registra las deflexiones del potencial por medio de un galvanómetro que responde a las variaciones de las corrientes que fluyen a través del circuito.

Existen algunos modelos teóricos de las curvas de potencial, aunque pueden existir diferencias notables con respecto a las curvas reales, siendo las principales las siguientes:





a.- Comúnmente la línea base de lutitas es recta y vertical, pero en algunos pozos y a profundidades someras, se desvía ya sea en forma total ó en los intervalos arcillosos y generalmente hacia la izquierda conforme decrece la profundidad.

b.- Cambio brusco en la línea base de lutitas, frecuentemente observado cuando hay un fuerte cambio en la salinidad de las aguas de formación.

c.- Inestabilidad en la curva del SP, principalmente en la parte superior de los agujeros en donde hay un movimiento apreciable de agua, como en los pozos artesianos, en donde la señal cambia constantemente, aún si el electrodo de registro se conserva estacionario. La inestabilidad desaparece abajo de la zona de agua en movimiento.

d.- Cambios de polaridad en la curva del potencial espontáneo en acuíferos de algunos pozos, aún teniendo sus aguas salinidades del mismo orden. Estos cambios son generalmente debidos a variaciones en el tipo de iones ó a las cantidades de algunos de esos iones.

Efecto de la porosidad: Aunque el potencial electroquímico no es influenciado por la porosidad, la amplitud de la curva -- del SP es indirectamente afectada por los cambios de porosidad. Una disminución en la porosidad de la roca, incrementa su resistividad reduciendo la amplitud de la curva del SP.



En acuíferos de tipo granular, empacados en formaciones arcillosas, la respuesta de la curva de potencial es clara y se puede considerar que: si las aguas en el acuífero son de mayor salinidad que el lodo de perforación, el SP es negativo y si las aguas son menos salinas que el lodo, el SP será positivo con respecto a la línea base de lutitas.

Los acuíferos que se encuentran interestratificados con capas de arcilla y capas densas, tanto la forma como amplitud — del potencial son diferentes de aquellos obtenidos en los acuíferos del caso anterior. La curva del potencial, generalmente se distorsiona y no puede por sí sola ser interpretada.

Cuando existen acuíferos asociados con rocas densas pero — ausentes de capas arcillosas, el potencial electroquímico discutido anteriormente, prácticamente desaparece y, al no haber otra fuente de potencial, la curva del SP es aproximadamente — una línea recta vertical.

Haciendo un resumen y mientras no se puedan aplicar las determinaciones cuantitativas de la curva del SP, es permisible — utilizar cualitativamente el potencial espontáneo de acuerdo — con las siguientes reglas generales:

1.- Los acuíferos que presentan un SP positivo bien definido ó estable, casi invariablemente contienen agua de menor salinidad que la contenida en el fluido de perforación.

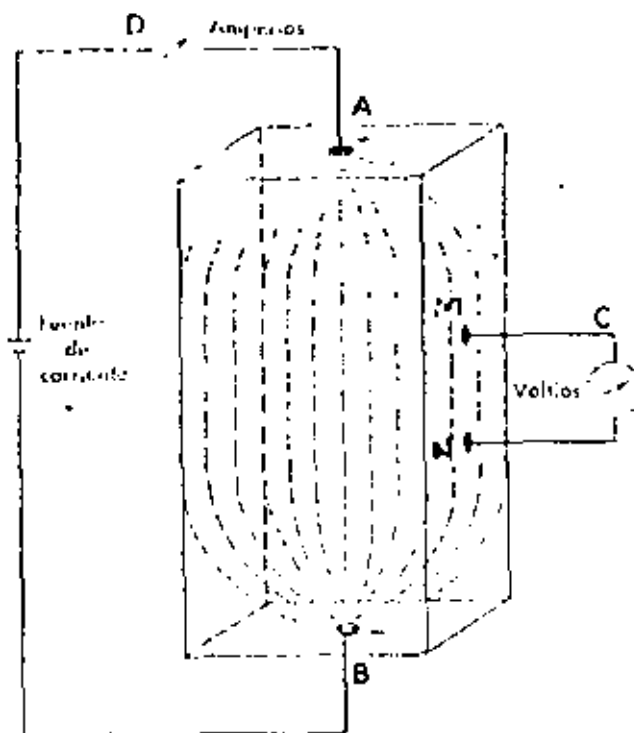
2.- En los intervalos en donde la amplitud del SP frente a los acuíferos potentes, permanece constante con respecto a la profundidad, todas las aguas de formación tienen aproximadamente la misma salinidad.

3.- Si la curva del SP en los acuíferos penetrados por un agujero, se presenta cada vez más negativo con la profundidad, indica que la salinidad de los acuíferos se incrementa con la profundidad.

4.- Los acuíferos que presentan un franco y amplio SP negativo, generalmente contienen aguas que son mucho más saladas que en donde el SP tiene una baja amplitud ó es positivo.

5.- Los cambios erráticos en la polaridad del SP, provocan que la amplitud del SP sea pequeña, pudiendo o no corresponder a cambios significativos en la salinidad del agua.

RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS.- La forma más simple de determinar la resistividad en las rocas, es considerar una muestra y conectar en las partes superior e inferior, los polos de un generador eléctrico. La corriente fluye del punto A al punto B a través de la muestra, siendo mayor el potencial en el punto A y teniendo una pérdida ó caída de potencial en el punto B debido a la resistencia eléctrica que ofrece la roca. La resistencia que ocasiona una pérdida de potencial entre M y N es una característica de la roca que está siendo analizada. A mayor resistencia eléctrica de la roca, corresponderá una mayor pérdida de presión entre los puntos M y N.



Si se considera una cierta unidad de volumen de roca, la resistencia ofrecida se puede considerar como una resistencia específica, llamada resistividad, la cual será una propiedad de la roca, independiente de la forma y dimensiones de la misma, en función únicamente de la naturaleza y temperatura del material considerado. En la práctica el efecto de la temperatura no es demasiado grande y puede ser despreciado, por lo que la resistividad de un material, puede ser considerada como dependiente de la naturaleza del mencionado material únicamente. Por otra parte, la resistencia es una propiedad eléctrica que depende no solamente de la



naturaleza del material considerado, sino también de la forma y dimensión de éste, siendo distinta por lo tanto, de la resistividad. Las expresiones que nos definen tanto una como otra propiedad, son las siguientes:

$$R = \frac{V}{I}, \text{ para la resistencia y}$$

$$R = \frac{r \cdot L}{A} \text{ para la resistividad.}$$

en donde:

I = corriente

V = Voltaje

R = resistividad del medio

r = resistencia del conductor ó de medio.

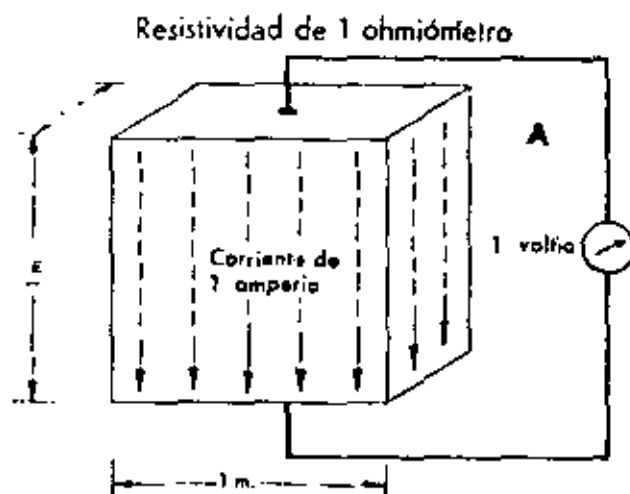
A = Area del conductor.

L = longitud del conductor.

Si la resistividad es la resistencia específica ó sea la resistencia por unidad de volumen, en las mediciones que se hacen de resistividad en los pozos, es común utilizar como unidad :

$\text{ohm} \times \frac{\text{metro}^2}{\text{metro}}$ ó simplemente ohm-metro.

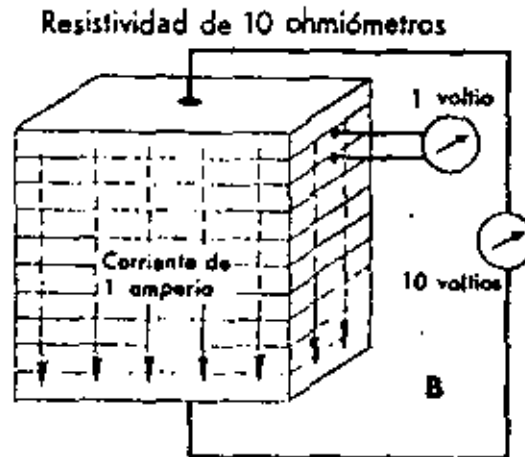
Para ilustrar el concepto, en la siguiente figura se tiene un cubo de un metro por lado de un determinado material,



Si la diferencia de potencial entre los extremos del cubo, es de un volt y la intensidad de corriente de un amperio, se tendrá representada la unidad de resistencia eléctrica: $\frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ amperio}} = 1 \text{ ohm}$

y también la unidad de resistividad: $1 \text{ ohm} \times \text{m}^2/\text{m}$, utilizada en registros eléctricos.

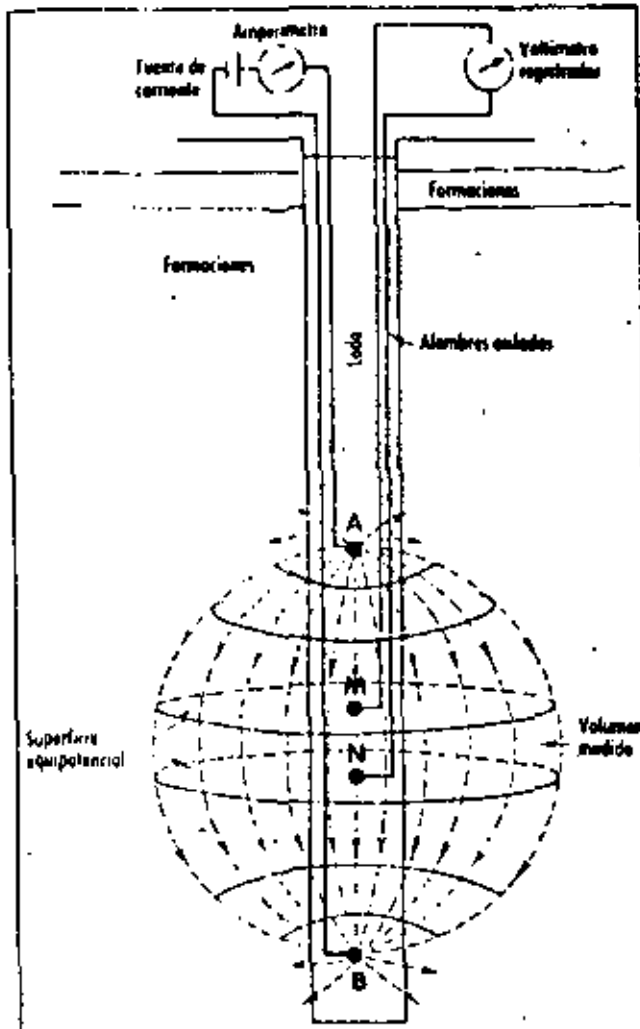
Si se tuviese el mismo volumen de roca y la misma corriente, pero una diferencia de potencial de 10 volts, la resistencia en tal caso será: $\frac{10 \text{ volts}}{1 \text{ ampere}} = 10 \text{ ohms}$ y la resistividad igual a: $10 \text{ ohms} \times \text{m}^2/\text{m}$, que puede expresarse más comúnmente como 10 ohms-metro.



MEDICION DE LA RESISTIVIDAD EN EL POZO.— Para efectuar la medición de la resistividad en pozos, se pueden utilizar los registros convencionales de resistividad, en los cuales se envían corrientes a la formación a través de unos electrodos y se miden los potenciales eléctricos entre otros. La medición de éstos potenciales permite determinar las resistividades.

Considerando una formación homogénea, isotrópica y de extensión infinita, en la cual se encuentran los electrodos A, B, M y N. Una corriente eléctrica es enviada entre los electrodos A y B, la cual fluirá en una trayectoria esférica dentro de la formación. Utilizando los electrodos M y N para medir el voltaje entre ellos, se puede investigar la resistencia entre las dos superficies equipotenciales que pasan por M y N.

En la práctica el medio que rodea a los dispositivos de medida no es homogéneo, por lo que la corriente fluirá desde el electrodo que se envía, en forma distorsionada.



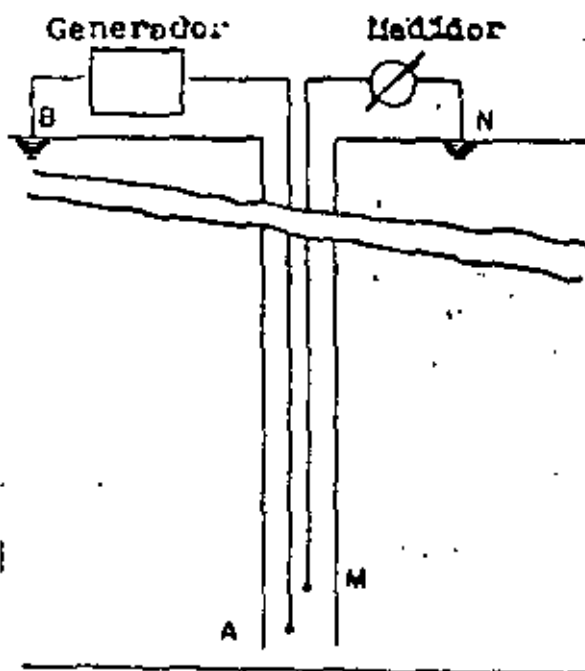
Los dispositivos usados para medir la resistividad, comúnmente llamados sondas, consisten fundamentalmente de un cable conductor múltiple que en el extremo que se introduce al pozo quedan dentro de un cilindro metálico, con orificios a ciertas distancias, en los cuales se localizan los electrodos. Con éstos - electrodos es posible formar distintos arreglos ó configuraciones de electrodos de medida y corriente. La distancia existente entre un electrodo de medida (M ó N de las figuras) y uno de corriente (A ó B en las figuras), se llama espaciamento, teniendo la particularidad de que a distintos espaciamentos miden la resistividad de las rocas a diferentes distancias a partir del eje del pozo. Si por penetración de la sonda se define el radio al cual la caída de potencial es el cincuenta por



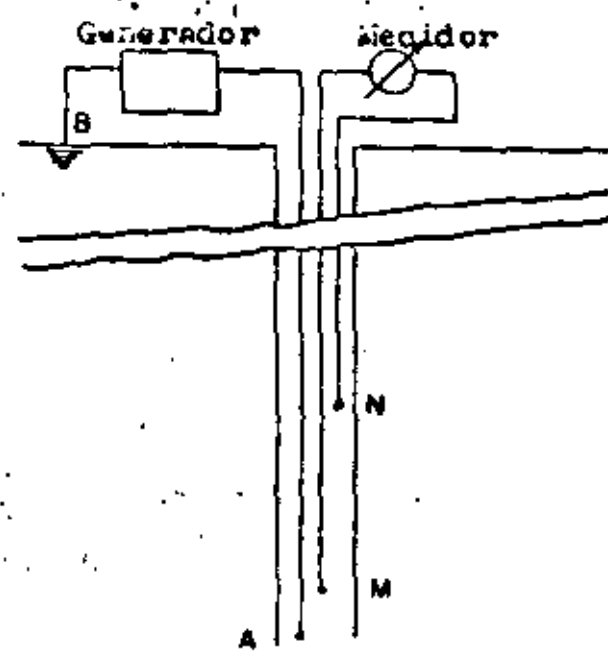
oiento de la caída total, se tiene que para algunos arreglos la penetración de investigación es el doble del espaciamento.

De acuerdo con el arreglo ó disposición de los electrodos de medida y de corriente, se construyen sondas que reciben nombres convencionales para su identificación por parte del analista y su diferenciación entre ellas.

SONDA NORMAL.- El dispositivo conocido con éste nombre, teóricamente lo integran un electrodo de corriente A y un electrodo de medida M dentro del pozo. Estos electrodos tienen una separación ó espaciamento pequeño en comparación con los otros electrodos B y N que cierran el circuito, que pueden quedar situados en la superficie. En la práctica el segundo electrodo de corriente B, también es bajado al pozo -- pero a una distancia tal del conjunto AM, que la influencia que pudiese tener en el potencial medido por M, en la mayoría de los casos es despreciable. El objeto de introducir también el electrodo B dentro del pozo, es el de utilizar el circuito para medir simultáneamente el potencial espontáneo. La figura siguiente ilustra tanto el circuito teórico como el arreglo real utilizado.



A).- CIRCUITO DE DOS ELECTRODOS



B).- CIRCUITO REAL

El espaciamiento comunmente empleado en las sondas normales es de 0.40 m. y 1.60 m. Estas gráficas se toman al mismo tiempo y para diferenciarlas entre sí, una de ellas, la de 0.40 m. de espaciamiento, recibe el nombre de normal corta y su gráfica se hace con raya continua. La de 1.60 m. de espaciamiento se conoce como normal larga y se grafica con raya discontinua. Estas dos curvas de resistividad nos indican la resistividad en zonas someras y más o menos profundas, en donde existe en todas aquellas rocas permeables, un cierto contenido del filtrado del lodo, el cual ha desplazado o se ha mezclado con el fluido original de la roca. En otras palabras, las sondas normales estarán midiendo a una distancia tal del pozo, que los fluidos existentes en la formación han sido alterados por la introducción en ella del filtrado del lodo principalmente en aquellas rocas permeables que tienen una porosidad pobre o regular. Esta zona afectada por el filtrado del lodo se conoce con el nombre de "zona de invasión" o "zona invadida". En los casos de formaciones con alta porosidad la invasión no es profunda y probablemente las mediciones hechas por la normal larga no se encuentran afectadas por la invasión del filtrado del lodo.

Las curvas típicas registradas por un dispositivo normal, indican:

- a) La curva es simétrica con respecto al centro de la capa.
- b) Las capas que tienen un espesor menor que el espaciamiento, indicarán una baja resistividad o depresión en la curva.
- c) Debido a su cierto espaciamiento y por lo tanto sujetas a la influencia del agujero y a la zona invadida, las curvas norma-



los no pueden ser adoptadas, en la mayoría de los casos, para mediciones directas de la resistividad verdadera (R_f) de la formación.

SONDA LATERAL.

Cuando se tiene un arreglo tal que sean tres electrodos - los que se bajen al pozo, mientras que un cuarto electrodo es conservado en la superficie, se trata de un arreglo de tres electrodos o un arreglo "Lateral". Este dispositivo lateral fué diseñado para atravesar la zona de influencia del agujero y la zona de invasión e investigar la resistividad de la roca sin alteraciones. En la figura del circuito, dos electrodos M y N están relativamente cerca con respecto del electrodo A. La distancia desde A hasta O, punto medio de M y N, es considerado el espaciamiento y al referirse a él se hará como AO.



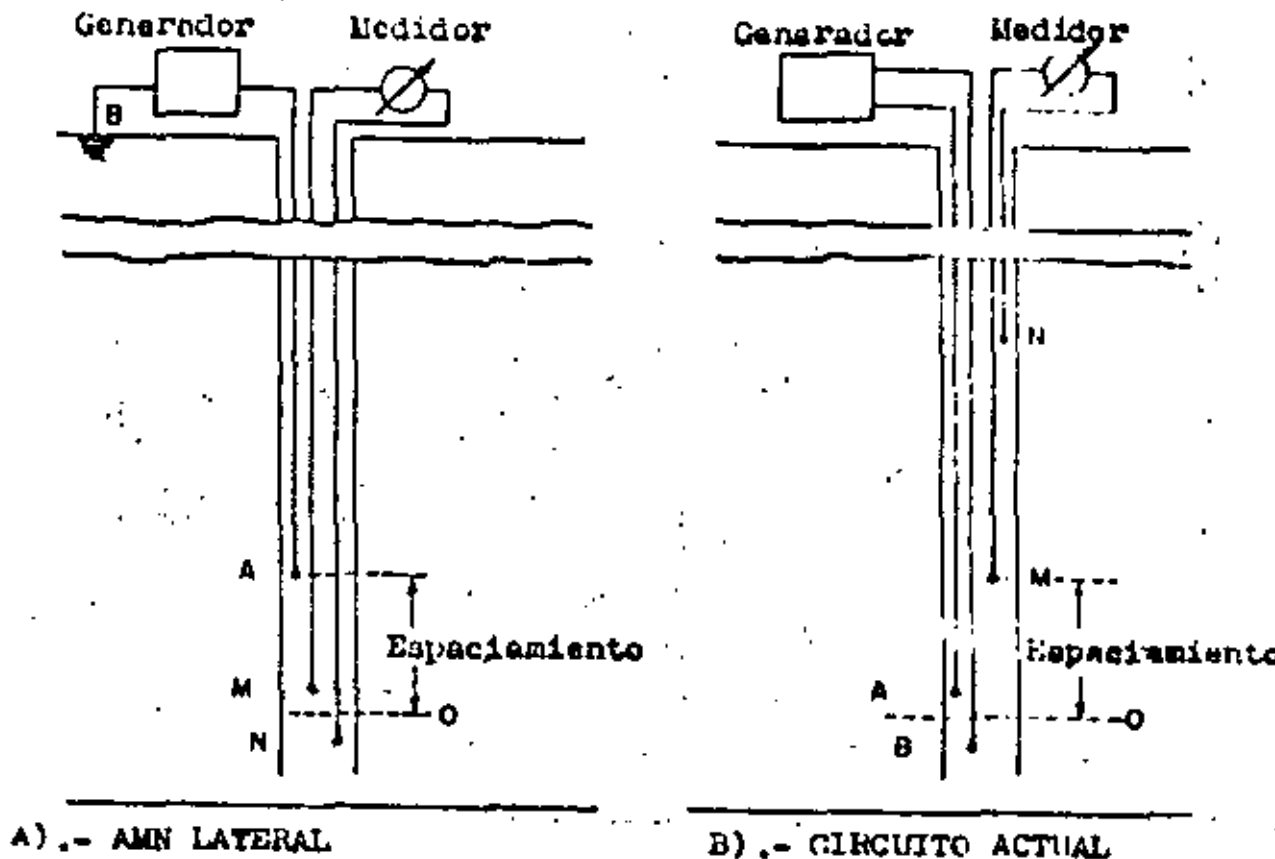


Figura 7

Aún cuando los efectos del agujero y de la zona invadida son despreciables en un espaciamiento AO suficientemente grande, las lecturas tomadas de este registro son consideradas como de una resistividad aparente (R_a) de la formación, por lo que es necesario aplicarle ciertas correcciones para convertirlas en resistividades verdaderas de la formación.

En la práctica el espaciamiento de la lateral es generalmente de 5.70 m. lo cual da un considerable radio de investigación, aunque también causa una pérdida de detalle en capas delgadas así como distorsión en determinados casos. Aún con este inconveniente, su uso en ocasiones es muy ventajoso.

Tipo de sonda	espaciamiento	radio de investigación
Normal corta	0.25 a 0.50 m	0.50 a 1.00 m.
Normal larga	0.50 a 2.00 m	1.00 a 2.00 m.
Lateral	4.00 a 10.00 m	4.00 a 10.00 m.

Características de investigación de distintos tipos de sondas

El concepto básico para la interpretación de las propiedades eléctricas de las rocas como auxiliar en el análisis de los fluidos contenidos en ellas, es el conocimiento que se tiene de que las rocas sedimentarias en general, tienen un cierto rango de porosidad ya sea de origen primario ó secundario y de que esos espacios intergranulares ó fracturas están ocupados generalmente por agua.

Una roca que tiene una porción de su volumen ocupado por agua, su resistividad depende en forma notable del tipo de agua contenida, pudiendo hacerse una diferenciación inicial entre una roca porosa que contiene agua salada y una roca semejante que contenga agua dulce, porque en el primer caso, o sea la roca con agua salada, como ésta es buena conductora de la electricidad, la resistencia ofrecida al paso de una corriente enviada a través de ese material será mínima, por lo que la resistividad medida en tales condiciones será baja; cosa distinta ocurre cuando ese mismo material poroso está ocupado por agua dulce, puesto que no es buen conductor eléctrico, dá por resultado que aparezcan valores más altos de resistividad al efectuarse su medición.

Esta característica general, que establece una diferenciación inicial entre los acuíferos de agua dulce y salada, por medio de sus resistividades, se combina con la medición del potencial espontáneo, que es la gráfica generada por los fenómenos electroquímicos de soluciones de distinta concentración, producidos en el pozo al entrar en contacto el filtrado del lodo de perforación, con el agua intersticial de las rocas. Efecto del filtrado del lodo en rocas permeables.- El lodo de perforación está constituido en términos generales por partículas coloidales y agua, siendo introducido durante la operación de perforación con una determinada presión por el interior de la tubería, sale por los orificios de la barrena en el fondo del pozo y regresa a la superficie por el espacio anular --

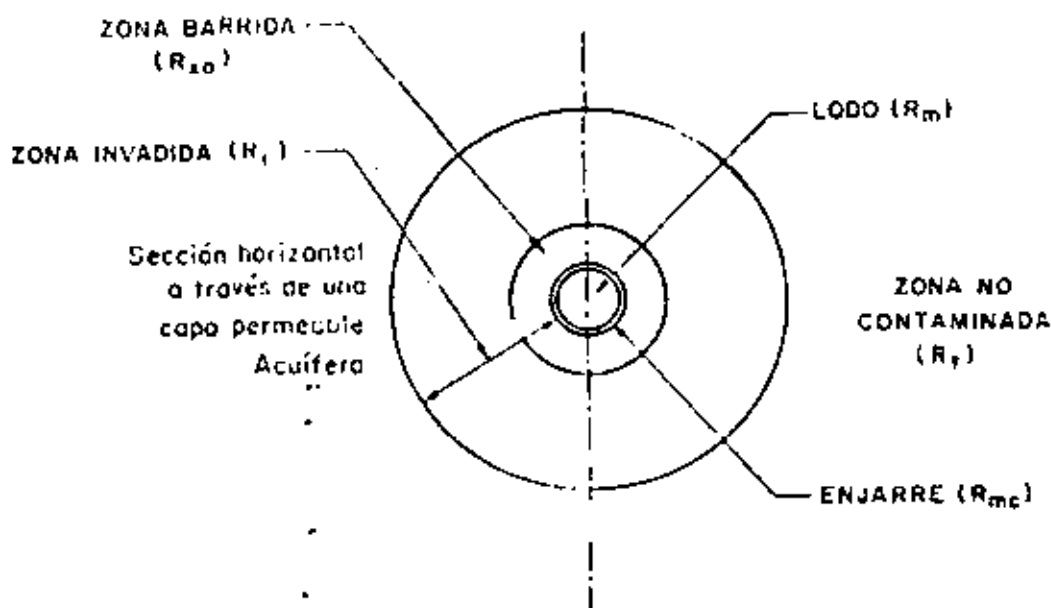


entre el exterior de la tubería y las paredes del pozo.

En los intervalos permeables atravesados, la presión del lodo hace que se forme una película con las partículas en suspensión y penetre en la roca agua constituyente del lodo, que recibe el nombre de filtrado del lodo. El agua ó filtrado del lodo que penetra en la formación permeable, puede ser de distinta composición en cuanto a salinidad, que la existente en la roca, alterando por lo tanto la resistividad de la roca en esa zona en que ha penetrado el filtrado del lodo.

Debido a éste fenómeno, se pueden distinguir a partir de la pared del pozo y en sentido horizontal, en la mayoría de las rocas permeables, las siguientes zonas:

- a). - Zona "lavada", que es la inmediata a la pared del pozo, y es donde probablemente haya habido un desplazamiento casi total del agua intersticial de la roca por la del filtrado del lodo.
- b). - Zona "invadida" ó de transición, es la zona inmediata a la zona lavada y que ha recibido parcialmente agua del filtrado del lodo.
- c). - Zona "no contaminada" que es la zona a donde no ha llegado el filtrado del lodo, conservándose intacta en cuanto a los fluidos originales de la roca.



La penetración del filtrado del lodo a la formación es variable, pues depende de varios factores que están un poco fuera de control, sin embargo, puede decirse que en lo relativo a la roca, mientras menor sea su porosidad, mayor puede ser la penetración del filtrado del lodo.

Para conocer con cierta confiabilidad a partir de la resistividad de la roca, si ésta contiene agua dulce ó agua salada, es indispensable tener la certeza de que las lecturas de resistividad han sido hechas en la zona no contaminada. Esta es la razón fundamental por la cual existen varias posibilidades de arreglos en las sondas, como son normal corta ó larga y lateral, ya que con una sola de ellas, aunque en muchos casos es suficiente, existe la posibilidad de que esté afectada su lectura por fenómenos de invasión del filtrado del lodo.

Clasificación de formaciones.- Para el propósito de interpretación de registros en pozos de agua, se ha encontrado conveniente clasificar las formaciones entre los siguientes grupos:

1.- Acuíferos granulares limpios. Comprende gravas, arenas, areniscas y rocas carbonatadas que tengan porosidad granular. el aluvión podría agregarse a éste grupo, si sus partículas no están compuestas de minerales arcillosos.

2.- Acuíferos granulares arcillosos.- Este grupo incluye cualquier acuífero granular que en parte esté compuesto de granos formados por minerales arcillosos ó contengan material arcilloso dentro de sus espacios porosos.

3.- Acuíferos fracturados. Representado por rocas fracturadas ó con juntas teniendo escasa ó ninguna porosidad de tipo granular.

4.- Acuíferos complejos, en los que la porosidad es un tipo diferente de los especificados anteriormente, por ejemplo, carbonatos que tienen porosidad granular y por fracturamiento, lava y rocas cavernosas.

5.- Formaciones densas, ó sea, rocas que tienen una porosidad efectiva tan baja, que normalmente no se podría obtener agua de ellas. Aparte de algunas rocas carbonatadas, se incluyen anhidrita, yeso, sal, así como muchas clases de rocas ígneas y metamórficas.



6.- Arcillas. En éste grupo se incluyen todas las formaciones que consisten de partículas muy finas, que reciben el nombre genérico de arcillas ó lutitas. Por tener todas ellas propiedades semejantes en cuanto al registro eléctrico y rayos gamma - se refiere, por razones de simplicidad son llamadas arcillas.

Por conveniencia, especialmente en el análisis del registro de rayos gamma, cualquier formación de los grupos 1 a 5 es llamada "roca".

Si se considera como un acuífero limpio, el constituido por una estructura rocosa no conductiva y agua intersticial, su resistividad queda determinada por:

- a).- La resistividad ó salinidad del agua.
- b).- La cantidad de agua que contiene ó sea la porosidad de la roca.
- c).- La distribución y continuidad del agua contenida en los espacios porosos.

De acuerdo con lo anterior, se ha encontrado que la resistividad R_t , de un acuífero limpio puede expresarse así:

$$R_t = F \times R_w \quad (1)$$

en donde:

R_w = resistividad del agua.

F = es una constante que representa el efecto de la porosidad.

La constante F , es denominada factor de resistividad de la formación ó simplemente factor de formación y está dada por la siguiente fórmula:

$$F = A/\beta^m \quad (2)$$

en donde:

β = porosidad efectiva.

A = constante que se determina empíricamente.

m = factor de cementación.

La resistividad del agua R_w , decrece cuando la salinidad se incrementa. A una temperatura dada, la resistividad del agua - está en relación con el contenido de sólidos disueltos, en partes por millón (ppm), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R_w = k/ppm \quad (3)$$

en donde k es un factor que es aproximadamente constante para una sal, cuando la concentración es baja (menos de 3000 ppm de sólidos disueltos). Para aguas de baja salinidad, $k=6500$ a 25°C .

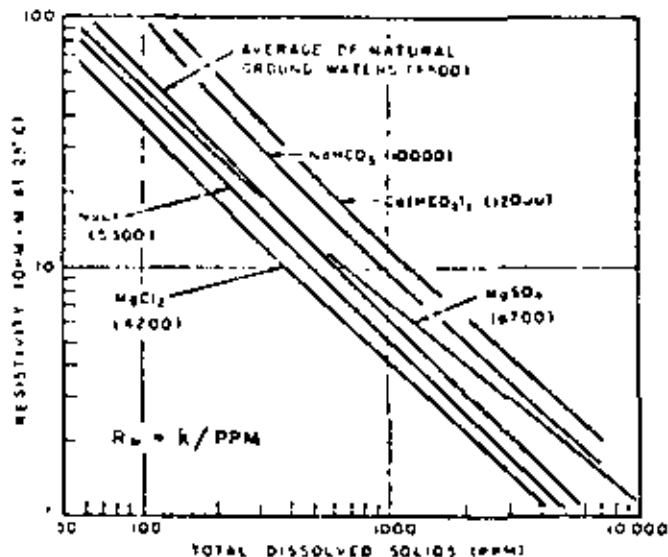


Fig. 1 - Solution resistivity vs. total dissolved solids at 25° C. Figures in parentheses are k values. (After Agriculture Handbook 60, USDA).

Para rocas granulares: limpias, que tienen una porosidad mayor del 10 por ciento, A y m tienen los siguientes valores:
 rocas poco cementadas ó no cementadas:

$$F = \frac{0.62}{\phi^{2.15}}$$

rocas que están más cementadas:

$$F = \frac{1}{\phi^2}$$

La siguiente figura ilustra la relación entre el factor de formación y la porosidad, utilizando los valores anteriores.

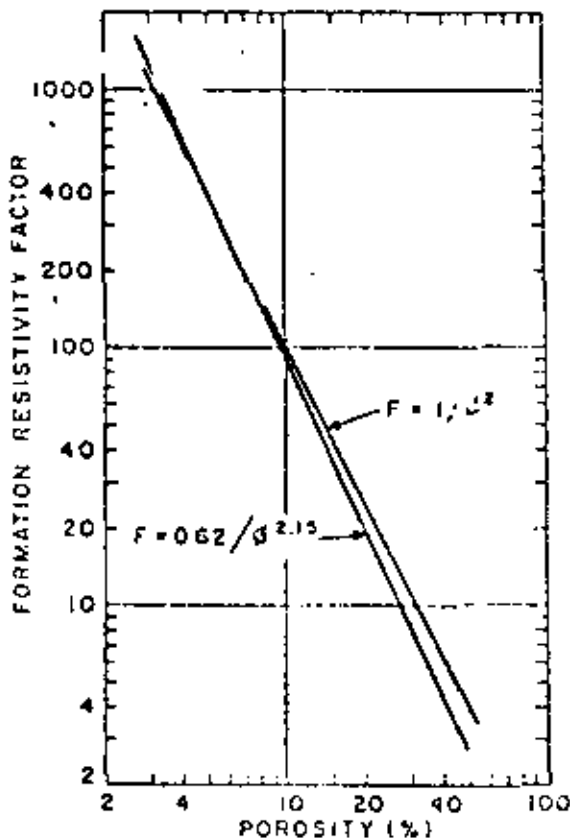


Fig. 2 - Approximate formation resistivity factor vs. porosity for granular aquifers.



Combinando las fórmulas (1), (2) y (3), así como el factor de formación de acuíferos granulares limpios, poco cementados, se obtiene:

$$R_t = \frac{0.62 k}{\phi^{2.15} \text{ ppm}} \quad (4)$$

La figura 3 es una carta basada en ésta fórmula, usando para k el valor de 6500. Esto proporciona la resistividad de acuíferos granulares limpios, como una función de sus porosidades, expresados en porcentaje del volumen total, utilizando unos cuantos valores de salinidad de aguas. Este nomograma es solamente aproximado cuando se aplica a acuíferos particulares puesto que A, m y k, tienen asignados valores promedio; sin embargo, es confiable en forma estadística y aceptable cuando no existen nomogramas más exactos, especialmente cuando la porosidad es alta.

La geometría y continuidad de los espacios porosos, en materiales de baja porosidad granular, es bastante irregular y no es posible asignar a los parámetros A y m, promedios ó valores aproximados que pudieran ser aplicables a una roca dada. A pesar de lo anterior, la fórmula (4) ó la figura 3, pueden ser usadas para obtener datos semi-cuantitativos.

Se puede observar en la figura 3 que los otros factores permanecen constantes:

1.- Para las mayores porosidades, corresponden a las menores resistividades del acuífero.

2.- Para las más bajas salinidades del agua, corresponden las más altas resistividades del acuífero.

La porción superior derecha de la figura 3 corresponde a los acuíferos de agua dulce, comúnmente sus resistividades son del orden de 50 a 1000 ohm-m. Los acuíferos de agua salobre y salada, de buena porosidad, tienen resistividades que son menores que los 50 ohm-m.

Los acuíferos no granulares, tienen una porosidad tan variable e irregularmente distribuida, que podría ser ilusorio buscar una expresión ó establecer una gráfica que relacione la resistividad con la porosidad. Todo lo que puede decirse con certeza es que la resistividad decrece cuando la porosidad ó salinidad del agua se incrementan, si los otros factores permanecen constantes.



Las arcillas que no tienen porosidad efectiva, tienen resistividades extremadamente altas, generalmente del orden de 100,000 ohm-m.

En cuanto a resistividad se refiere, las arcillas pueden ser consideradas como un material granular, cuyos espacios porosos tienen una geometría particular. Por lo anterior, la fórmula (2) es aplicable, pero los parámetros A y m tienen valores que probablemente sean algo diferentes de aquellos previamente especificados.

Las arcillas tienen una alta porosidad y generalmente contienen agua salobre, dos factores que hacen que sus resistividades sean bajas: comúnmente en el rango de 2 a 10 ohm-m, esto es, que tienen más bajas resistividades que la de los acuíferos de agua dulce, con los que están asociadas. Este rango se muestra en la porción inferior derecha de la figura 3.

Acuíferos granulares arcillosos.— La arcilla diseminada — dentro de los espacios porosos, reduce la resistividad de los acuíferos de agua dulce. La figura 4 proporciona la resistividad reducida para un acuífero granular, como una función de su contenido arcilloso.

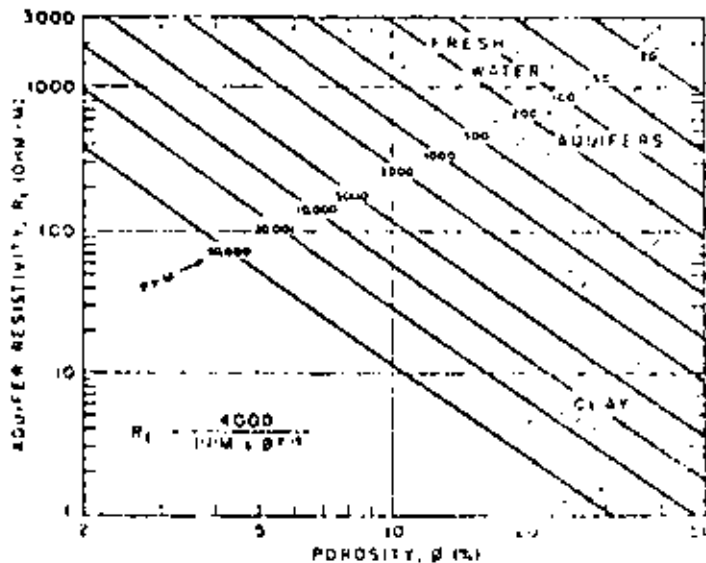


Fig. 4. Approximate resistivity of granular aquifers vs. porosity for several water salinities.

La curva ó curvas de resistividad, se toman simultáneamente con la del potencial espontáneo y su conjunto es, como se mencionó anteriormente, el registro eléctrico.

La ventaja de disponer de dos ó más curvas de resistividad en un registro eléctrico, es la posibilidad de establecer con mayor confiabilidad, aún en el análisis cualitativo, si las lecturas de resistividad de la roca están efectuándose sin la influencia de agua filtrante durante la operación del pozo.

Como una guía general para el análisis cualitativo del registro eléctrico, se puede considerar la siguiente figura que representa un registro con dos curvas de resistividad con diferente espaciamiento y el potencial natural; el lodo de perforación es de agua dulce.

Las formaciones A_1 , A_2 , ..., son de lutita considerando:

- a).- La uniformidad en la curva de potencial.
- b).- La resistividad es baja y muy semejante en valor en -- las dos curvas.

La formación B es una arenisca con intercalación de lutitas-- por las siguientes razones:

- a).- El potencial manifiesta amplitud negativa.
- b).- La resistividad mostrada en ambas curvas, tiene un valor ligeramente mayor que el de las lutitas, indicando que están presentes arena y lutitas.

La formación C_1 es una arena con agua dulce por:

- a).- La curva del potencial natural es positiva.
- b).- Ambas curvas de resistividad muestran valores altos.

La formación C_2 es una arena petrolífera debido a:

- a).- La curva de potencial espontáneo es negativa en forma amplia.
- b).- La resistividad con el espaciamiento corto, es mayor -- que la del otro espaciamiento por la influencia del filtrado del lodo.
- c).- La resistividad con el espaciamiento largo, también tiene valor alto, atribuible a la presencia de petróleo.

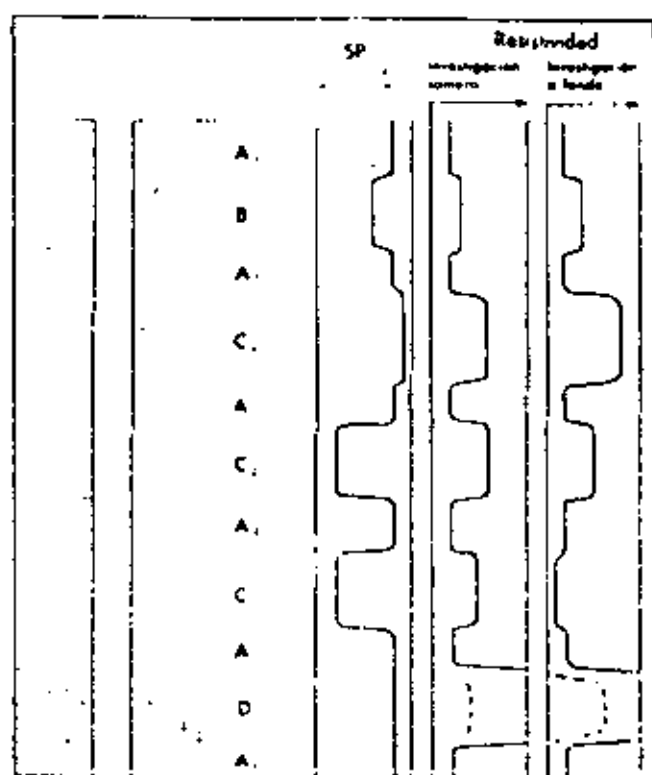
La formación C_3 , es una arena con agua salada por:

- a).- El potencial muestra deflexión negativa amplia.
- b).- La resistividad del espaciamiento corto, es alta, debido al desplazamiento del agua salada por agua dulce del filtrado del lodo.
- c).- La resistividad del espaciamiento largo es muy baja, -- por estar midiendo atrás de la zona lavada en donde la roca tiene agua salada que es conductiva.

La formación D es de una caliza dura por:

- a).- P no tiene desplazamiento, indicando impermeabilidad en la roca.
- b).- Ambas resistividades son muy altas.

Estas reglas básicas para la interpretación de registros eléctricos, se complementan con la información geológica del área, así como de la obtenida durante la perforación del pozo. Es conveniente cuando el caso lo amerite, disponer de información que proporcionan otro tipo de registros como el microregistro, sísmico, radioactivo, etc.



PRESENTACION ESQUEMATICA de las curvas típicas de las necesarias para establecer las reglas básicas de interpretación a b

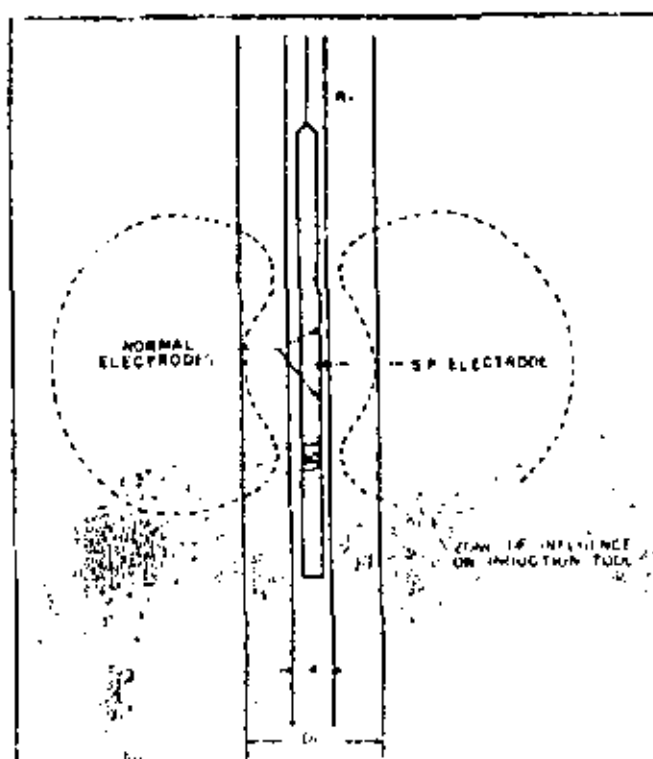


REGISTRO DE INDUCCION

Actualmente se encuentra generalizado el uso del registro de inducción para determinar de manera más confiable el tipo de fluidos contenidos en las rocas, sin influencia del filtrado del lodo que penetra en éstas durante la perforación del pozo.

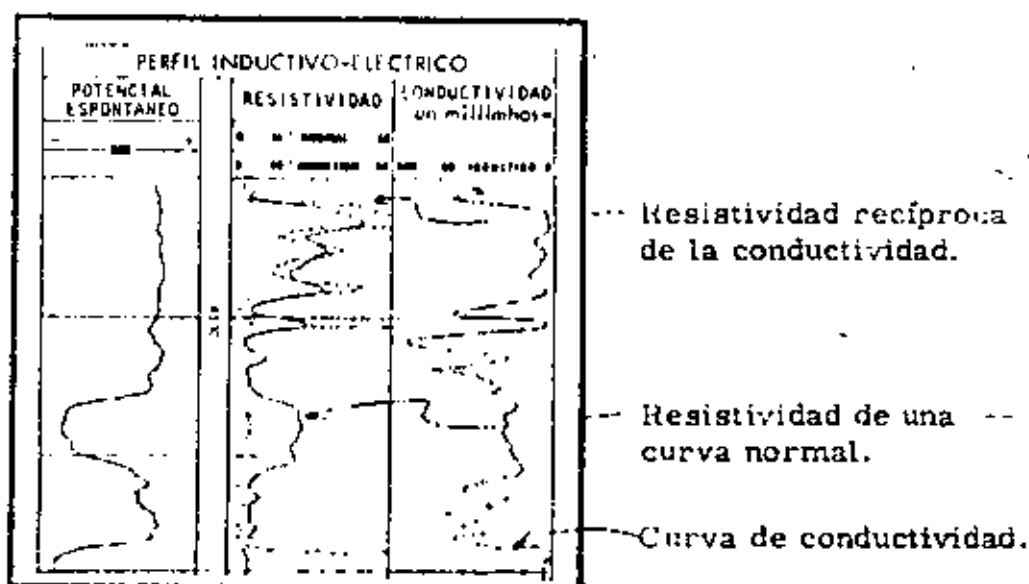
El registro de inducción mide la conductividad de las formaciones, mediante corrientes alternas inducidas. La resistividad en las rocas es determinada con el cálculo de la recíproca de la conductividad que se mide con el registro de inducción, apareciendo en la gráfica tanto los valores de resistividad calculados como los de conductividad.

Las sondas de inducción tienen un grupo ó sistema de varias bobinas transmisoras y receptoras. En forma esquemática se puede ver en la figura siguiente una bobina transmisora que envía corriente alterna de alta frecuencia y de intensidad constante, generándose un campo magnético que induce corrientes secundarias en la formación. Estas corrientes crean a su vez campos magnéticos que inducen señales en la bobina receptora. Las señales recibidas son proporcionales a la conductividad de la formación.



El registro de inducción proporciona valores que requieren poca ó ninguna corrección por diámetro de agujero, resistividad del lodo, invasión del filtrado ó espesor de las capas. Tiene además la ventaja en la perforación de pozos de agua de no requerir para su funcionamiento, que exista algún líquido dentro del pozo, por lo que es el más conveniente en aquellos pozos que se perforan con pulseta.

La combinación del registro de inducción es al igual que el registro eléctrico convencional, pudiendo ser juntamente con una curva de potencial natural ó con una de rayos gamma para definir los estratos ó cuerpos litológicos que se atraviesan.



REGISTRO DE RAYOS GAMMA.— El registro de rayos gamma es una medida de la radioactividad natural de las formaciones. En las rocas sedimentarias refleja el contenido ó la presencia de lutita, esto es debido a que los elementos radioactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas.

Las formaciones limpias (sin contenido de arcilla), tienen generalmente un nivel bajo de radioactividad, a menos que estén contaminadas con cenizas volcánicas, cantos rodados graníticos que sean radioactivos ó bien si sus aguas intersticiales tienen sales de potasio disueltas.



El registro de rayos gamma puede ser tomado en pozos que ya han sido adernados, lo cual lo hace útil en operaciones de reconodicionamiento.

La particularidad del registro de rayos gamma de identificar por su contenido radioactivo a las arcillas, diferenciándolas de otras rocas, lo hace convenientemente sustituible del potencial espontáneo cuando éste no es satisfactorio.

Los rayos gamma son erupciones de ondas electromagnéticas de alta energía que son emitidas espontáneamente por algunos elementos radioactivos. Casi toda la radiación gamma en la tierra es emitida por el isótopo radioactivo del potasio de peso atómico 40 y por elementos radioactivos de la serie uranio y torio.

La emisión de los rayos gamma, por la desintegración de los elementos radioactivos, se hace juntamente con los rayos alfa y beta, pero éstos tienen un poder de penetración bajo a través de la materia por lo que no pueden ser medidos en un pozo.

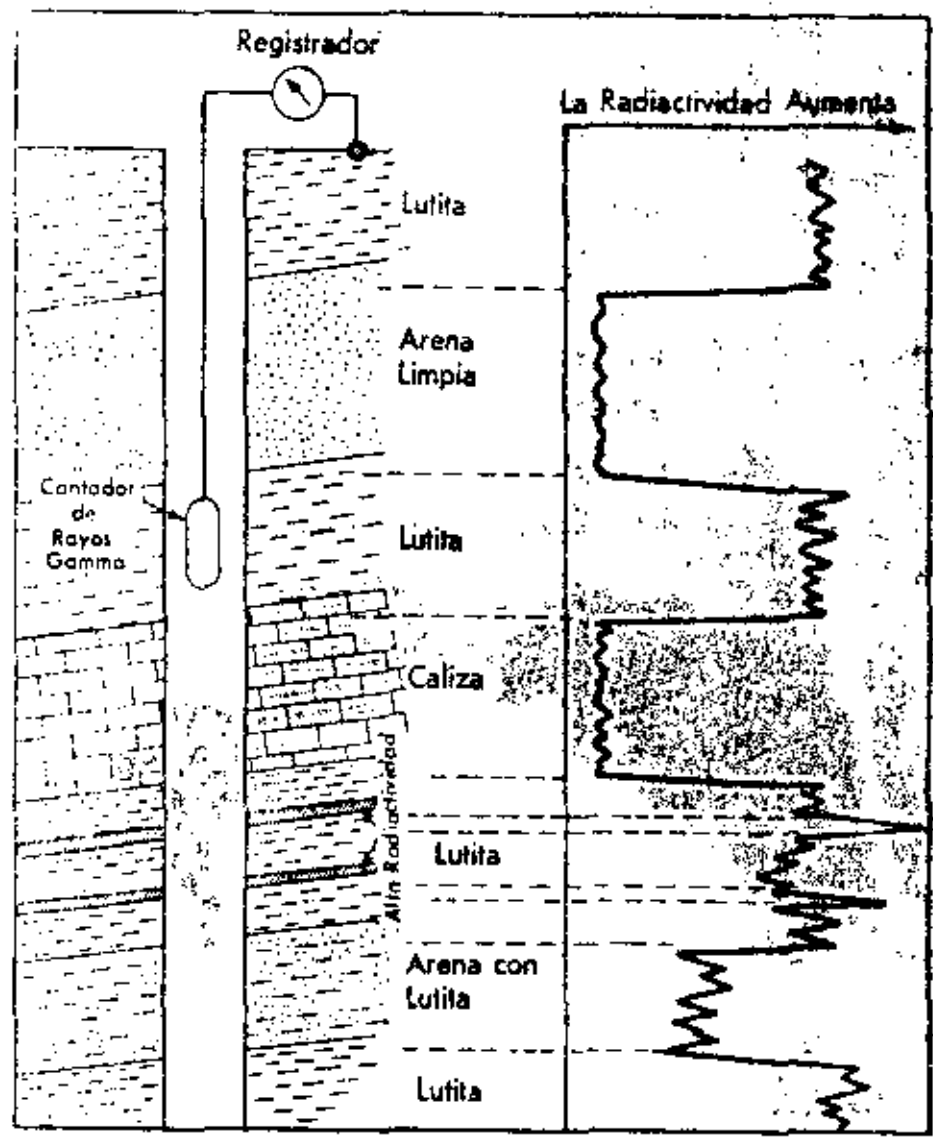
La energía de los rayos gamma emitida por las rocas sedimentarias, es variable, pero en promedio es de 1 Mev, aunque la emitida por el potasio tiene una energía de 1.5 Mev.

Los rayos gamma, que son ondas electromagnéticas como la luz y el calor, no paran su penetración en forma repentina, sino que declina gradualmente con la distancia. En general se puede decir que la distancia investigada por el registro de rayos gamma es de aproximadamente 30 centímetros en acuíferos de arena y caliza.

Detección de los rayos gamma.- Los rayos gamma no pueden ser detectados directamente, solamente a través de su interacción con la materia por medio del proceso de ionización; esto es liberando uno ó más electrones de átomos neutros. Debido a que tanto los iones y electrones están eléctricamente cargados, el proceso puede ser detectado.

Hay tres distintos tipos de detectores que han sido usados para el registro de la radioactividad natural: La cámara de ionización, el contador Geiger-Mueller y el de centelleo.

Una tonelada métrica de una lutita promedio, contiene aproximadamente unos 6 gramos de uranio, 12 de torio y 20 kg de potasio aunque el potasio es cerca de 1/10,000 menos radioactivo. La contribución respectiva del potasio, uranio y torio, es de importancia comparable.



En la figura aparece en forma generalizada la respuesta de una sonda con registrador de rayos gamma en distintas formaciones. La radioactividad natural de las rocas se grafica de menor a mayor cantidad a partir de la izquierda de la pista, dando un aspecto muy semejante a la gráfica del potencial natural para facilitar en caso necesario, su comparación ó correlación.

La radioactividad total según la registran el detector se puede expresar en términos del peso de un elemento (radio por ejemplo) que produzca una cantidad de radiación equivalente. Por lo tanto la intensidad de las rocas se puede calibrar en microgramos de radio equivalentes por tonelada métrica de esa formación. También se puede medir en unidades rayos gamma API. Las unidades API indican la radioactividad de una roca artificial que sirve de norma, en la que se han diseminado cantidades conocidas de uranio, torio y potasio. Todos los registros actuales están calibrados en unidades API.

La sonda de rayos gamma contiene un detector para medir la radiación originada en el volúmen de formación cercano a la sonda. Se ha generalizado el uso de cintilómetros para la medición de la radioactividad en pozos. Son más eficientes que los contadores Geiger-Mueller que se usaban antes.

Los rayos gamma pueden ser registrados simultáneamente con otro tipo de curvas.

En la actualidad ningún equipo comercial permite la diferenciación de rayos gamma del potasio y de la serie de uranio y torio. Un equipo tal tendría que ser sensible a variaciones en el nivel de energía de los rayos gamma.

Variaciones estadísticas. Dada la naturaleza estadística de la radiación, el número de rayos gamma que llegan al contador fluctúa incluso cuando la sonda está inmóvil en el pozo. Las variaciones son más grandes para un número bajo de cuentas ó pulsos. Sin embargo el número de rayos gamma contados por segundo sobre un período de tiempo suficientemente largo será prácticamente constante. El período de tiempo necesario para obtener un buen promedio de cuentas, usualmente es de varios segundos.

Se utilizan circuitos amortiguadores de variaciones estadísticas a base de acoplamiento capacitor-resistor en los circuitos de medida, pudiendo seleccionarse distintas "constantes de tiempo" de acuerdo con el nivel de radioactividad medido.

El circuito amortiguador de variaciones estadísticas introduce un retraso en el registro de la señal y para evitar una excesiva distorsión en la curva, se elige una velocidad de registro tal que el contador no se desplace más de un pié durante una constante de tiempo. Así por ejemplo para una constante de tiempo de 2 segundos, la velocidad de registro es de 1800 piés/hora (550 metros/hora.)



Aplicaciones del registro de rayos gamma.

1.- El registro de rayos gamma es particularmente útil para la definición de estratos de lutita, cuando la curva del SP está redondeada (en formaciones muy resistivas) ó cuando no tiene expresión por ser la resistividad del filtrado del lodo muy semejante a la del agua intersticial.

2.- Puede ser usado para efectuar correlaciones.

3.- Algunas veces el registro de rayos gamma es usado en relación con operaciones en que se usan trazadores radioactivos.

Bibliografía:

F.L. Bryan

Application of Electric Logging to Water Well Problems.
Water Well Journal, Vol. 4, No. 1, January-February, 1950.

Carl Gatlin

Petroleum Engineering. Drilling and Well Completions.
Prentice-Hall, Inc. 1960.

Hubert Guyod:

"Interpretation of electric and gamma ray logs in water wells."
The Well Log Analysts - January-March 1966.

L.A. Luzin.

¿Qué es Perfilaje de Pozos?
Artículos publicados de junio a diciembre de 1962. Petróleo Interamericano.

R.W. Hamilton and J.L. Myung.

Summary of Geophysical Well Logging. Birdwell Division.

Schlumberger Limited

Fundamentos de la interpretación de perfiles. julio de 1970.



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



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

EL USO Y LA APLICACION DE TRAZADORES PARA AGUA SUBTERRANEA

ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

OCTUBRE, 1980



EL USO Y LA APLICACION DE TRAZADORES
DE AGUA SUBTERRANEA

Por: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

R E S U M E N

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.

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 esporas 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, pierdo 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.

ROSINA.- 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.

AMFROHODAMINA G EXTRA.- Conocida anteriormente como sulfocobal-

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, rodamina 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 propanol y 5 partes de hidróxido de amonio.
- b) Ocho partes de N-N dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

La rodamina 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.

ETHOPAL, 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 3 ppm. Con espectrofluorómetro se pueden detectar hasta 440×10^{-3} ppm. Valores menores son concentrados por medio de carbón activado del cual la fluoriceina 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 observar que el agua subterránea fluye en dirección Sureste, a una velocidad de 1.5 m/hr .

9

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 entra al 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 el

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 600 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 fluorocina (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 50 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 base convexa. 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 pizca 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 ^{18}O . 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 tiene



ne 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 aplica-- do 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 o 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.



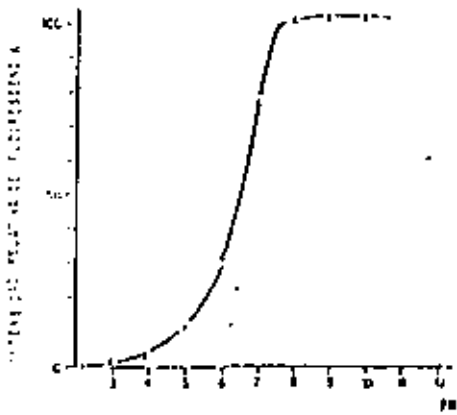


FIGURA 1

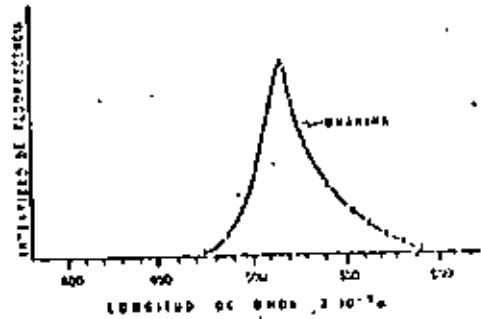


FIGURA 2

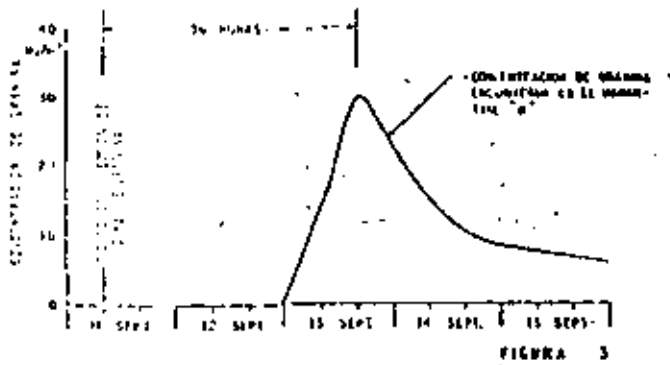


FIGURA 3

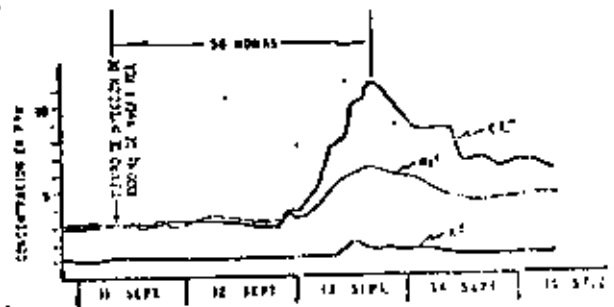
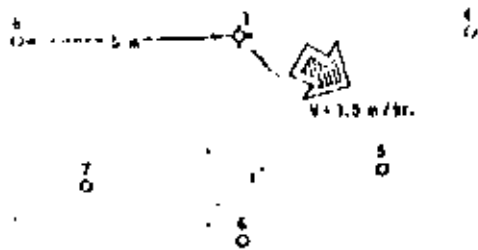


FIGURA 4



EXPLICACION

- 1 PUNTO DE INYECCION
- 2 PUNTO DE MUESTREO
- 3, 4, 5, 6, 7 PUNTO DE MUESTREO DEL TIPO "a"

$V = 1.5 \text{ m/hr.}$
 $C = 5 \text{ unidades}$
 $L = 100 \text{ minutos}$



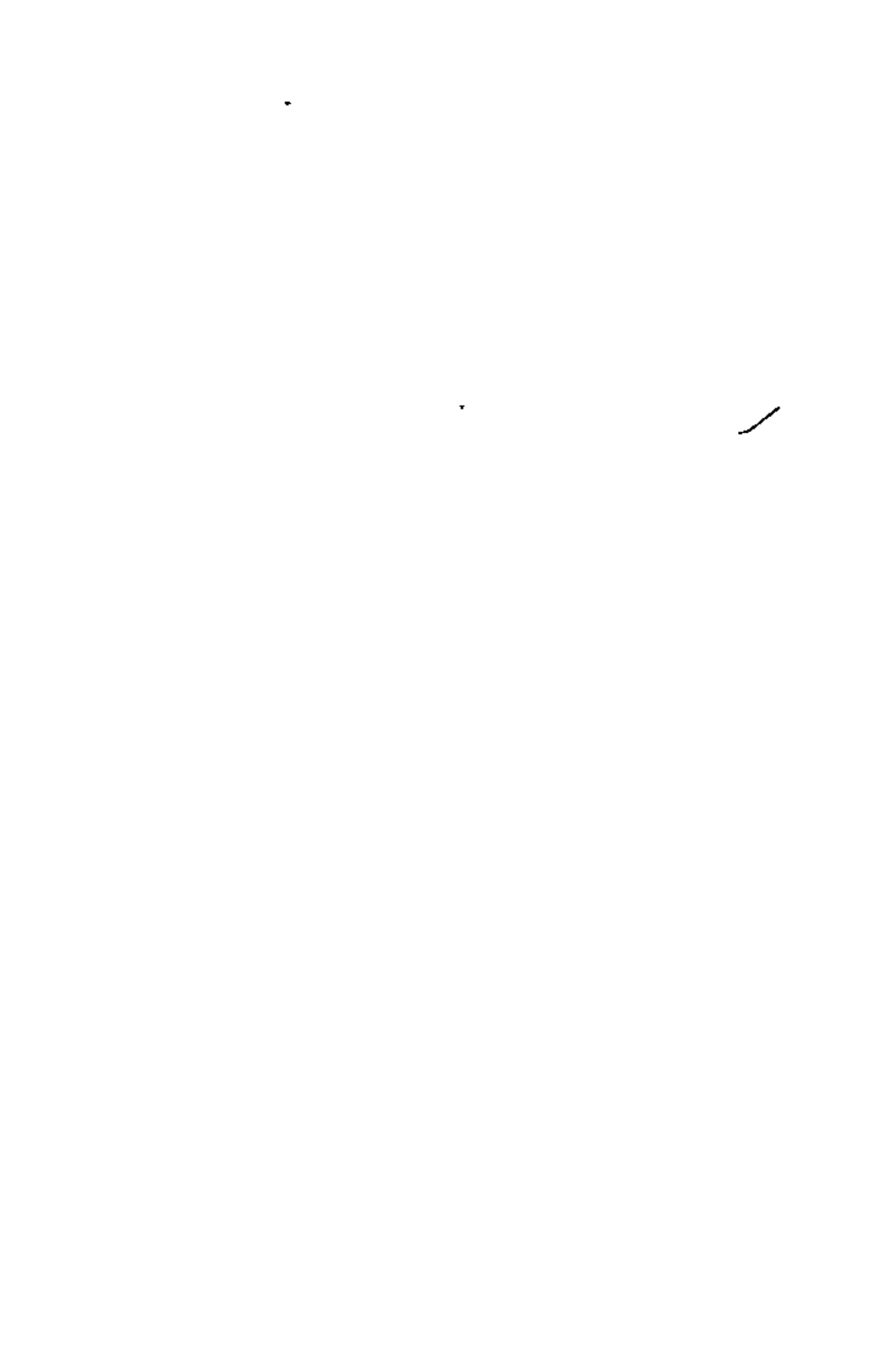
FIG. 5

FIGURA NO. 4

REFERENCIAS

- Akin, G.W. and J. V. Largerwerff, 1965. "Calcium Carbonate - Equilibria in Solutions Open to the Air.- I.- The solubility of Calcite in Relation to Ionic Strength". Geochim. et Cosm. Acta. 29 (4), 343-352.
- Akin, G.W. and J. V. Largerwerff, 1965. "Calcium Carbonate - Equilibria in Solution Open to the Air. II.- Enhanced Solubility of Calcium Carbonate in the Presence of Magnesium and Sulfate" Geochim et cosm. Acta. 29 (4), 353-360.
- Back, William and B. Hanshaw, 1970. "Comparison of the Chemical Hydrogeology of the Carbonate Peninsulas of Florida and - Yucatan". Jour. of Hyd., Vol. X-4.
- Back, William, 1961. "Calcium Carbonate Saturation in Ground Water, From Routine Analyses." "U.S.G.S., W.S.P." 1535-D.
- Back, W. and B. Hanshaw, "Chemical Geohydrology"
- Back W. and J. Zötl., 1975, "Application of Geochemical Principles, Isotopic Methodology and Artificial Tracers to Karst Hydrology".
- Banks, H.O., and Richter, R.C., 1953, "Sea-water intrusion -- into Ground-water Basins Bordering the California Coast and Island Bays". American Geophysical Union Transactions, Vol. 34, - No. 4 pp. 575-582.
- Banks, H.O., Richter, R.C. y Harder, J., 1957, "Sea Water Intrusion in California", American Water Works Association, Vol. 49, No. 1 pp. 71-88.
- Bruington, A.E., y Seares, F.D., 1965, "Operating a Sea Water Barrier Project", American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division, Vol. 91, No. IRI.
- Bruington, A.E. Drescher, W.J. y Sherwood, C.B. 1969, "saltwater Intrusion in the United States"., American Society of Civil Engineers Proceedings, Journal of the Hydraulics Division, Paper 6788, HY 5, pp. 1651-1669.
- California Department of Water Resources, 1957, "Report by -- Los Angeles County Flood Control District on Investigational Work for Prevention and Control of Sea Water Intrusion West -- Coast Basin Experimental Project, Los Angeles County", Boletín No. 63 Apendice B.

- California Department of Water Resources, 1958, "Sea Water Intrusion in California", Boletín No. 63.
- California Department of Water Resources, 1960, "An Investigation of Some Problems in Preventing Sea-Water Intrusion By --- Creating a Fresh-Water Barrier", No. 63 Apendice D.
- California Department of Water Resources, 1970, "Oxnard Basin Experimental Extraction Type Barrier", Boletín 147-6.
- Cooper Hilton H., U.S., Geological Survey, Water Supply Paper 1613 C.
- Castany, G., 1963. "Traité Pratique Des Eaux Souterraines".
- Dansgaard W., 1964, "Stable Isotopes in Hydrology" Tellus 16, 436-468.
- Davis, S.M. and Dewiest, 1971. "Hidrogeología".
- Dechant, M., 1967 "Die Färbung der Lycopodiumspores" Steir - Beitr. Z. Hydrogeologie, 18/19, 241-247.
- Dechant M., 1977, "The Dyeing of Lycopodium-Sopres" Notes of The Ground Water Tracing Techniques Course" Graz, Austria.
- Fairbridge, R.W. "Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Science".
- Garrels and Chirst, 1965. "Solution, Minerals and Equilibria".
- Garrels and Mackenzie, 1971. "Envolution of the Sedimentary - Rocks".
- Gonfiantini, R., 1971 "Notes on Isotope Hydrology" International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria.
- Hem, John. "Calculation and Use of Ion Activity" U.S.G.S. - W.S.P.
- Hem, John, 1971. "Study and Interpretation of The Chemical - Characteristics of Natural Water". G.S.W.S.P. 1473.
- Institute for Karsresearch SAZU. "Underground" Yugoslavia.
- Krauskopf, K.B., 1967. "Introduction to Geochemistry".
- Klein, H., 1969, "Salt Water Intrusion Can be Controlled", - Florida Board of Conservation, Division of Geology.
- Payne R.B., 1975 "Isotope Hydrology" International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.



1

Piper, A.H., 1944. "A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses". Am. Geophys. Union Trans.

Richter Raymond C., 1972 "Ground Water Course", Chapter 2, California Department of Water Resources.

Stumm, W. and J. Morgan, 1970. "Aquatic Chemistry". an Introduction. Emphatizing Chemical Equilibria in Natural Waters.

Suelos Salinos y Sódicos, 1954 Manual de Agricultura No. 60 - Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América.

Todd, David K, 1959, Ground Water Hydrology, John Wiley and Sons, pp 177.

Water Quality Criteria, 1972, Report of the National Technical Advisory Comitee to the Secretary of the Interior.

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 Speleol. Neuchatel 1971, 78-83.

Zotl J. G., 1965, "Carst Hydrological investigations for the Construction of the Diessbach Reservoir".





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



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

HIDROGEOQUIMICA

ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

OCTUBRE, 1980



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

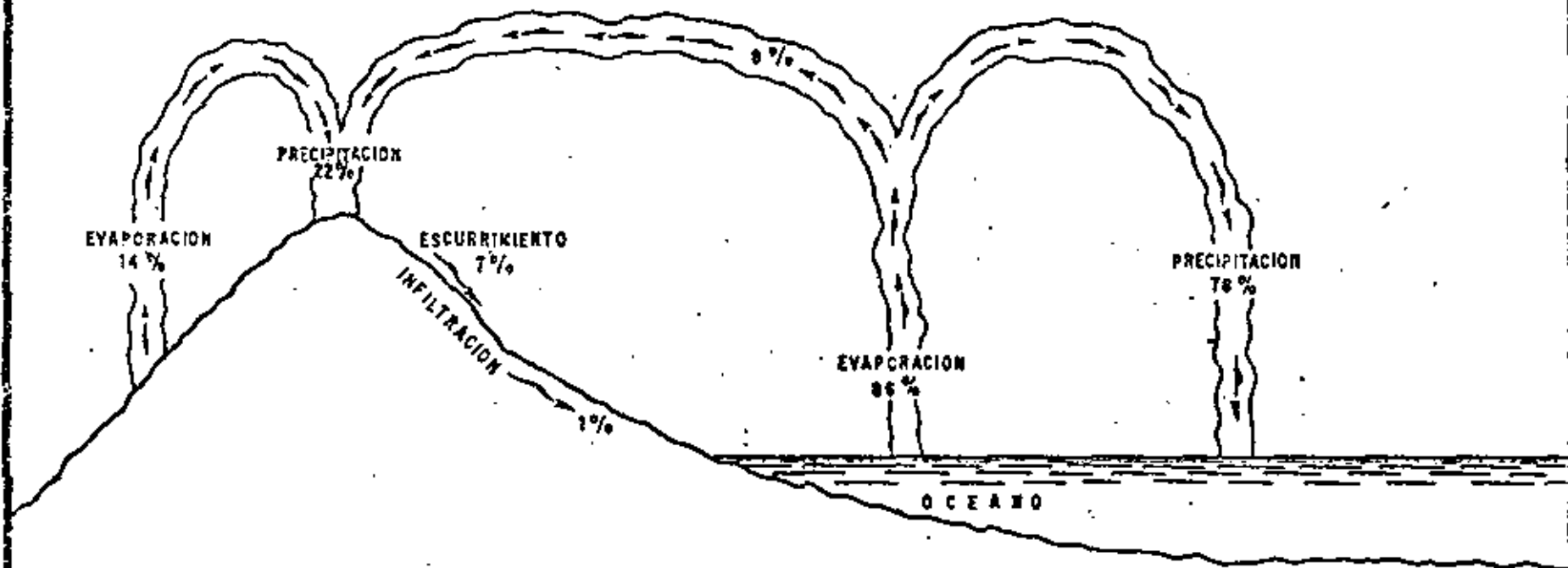


FIG.- 1

la solubilidad y composición de las rocas por las que circula y de los factores que afecten 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.

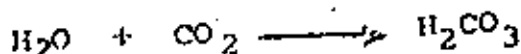
La composición química general del agua de lluvia, según Garrels y Mackenzie (1971), es la siguiente: (Figs. 2 y 3)

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

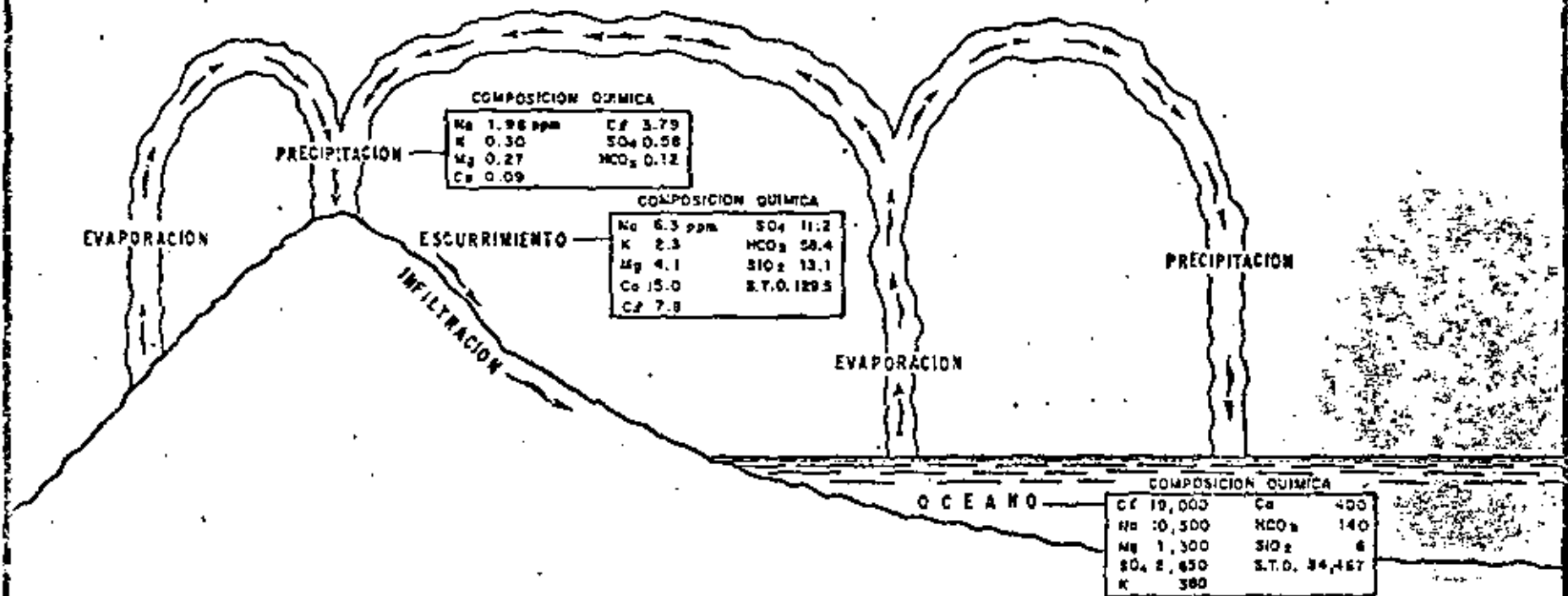


FIG. 2



ILUSTRACION SOBRE LA COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA EN DIVERSAS CIRCUNSTANCIAS

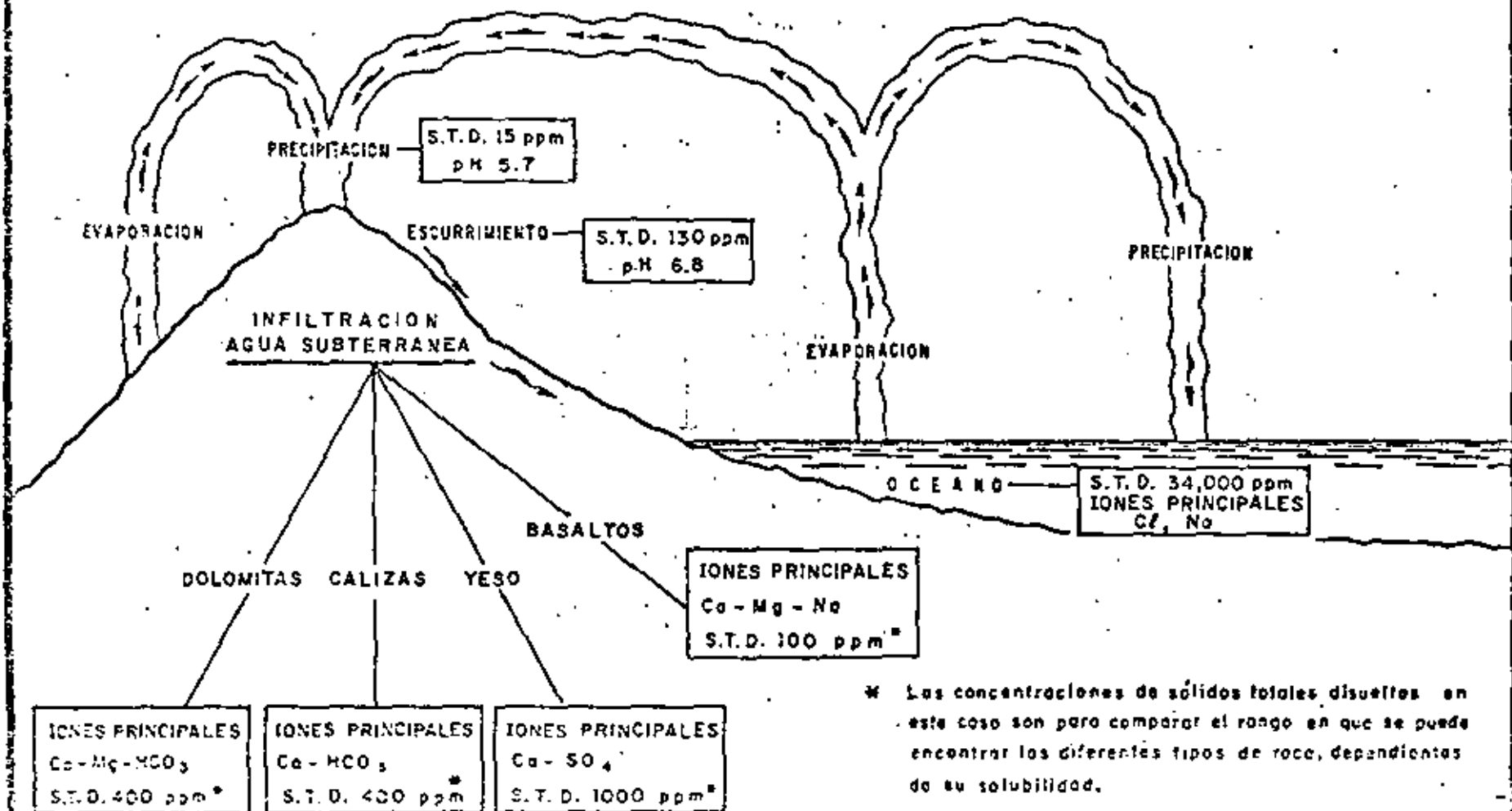
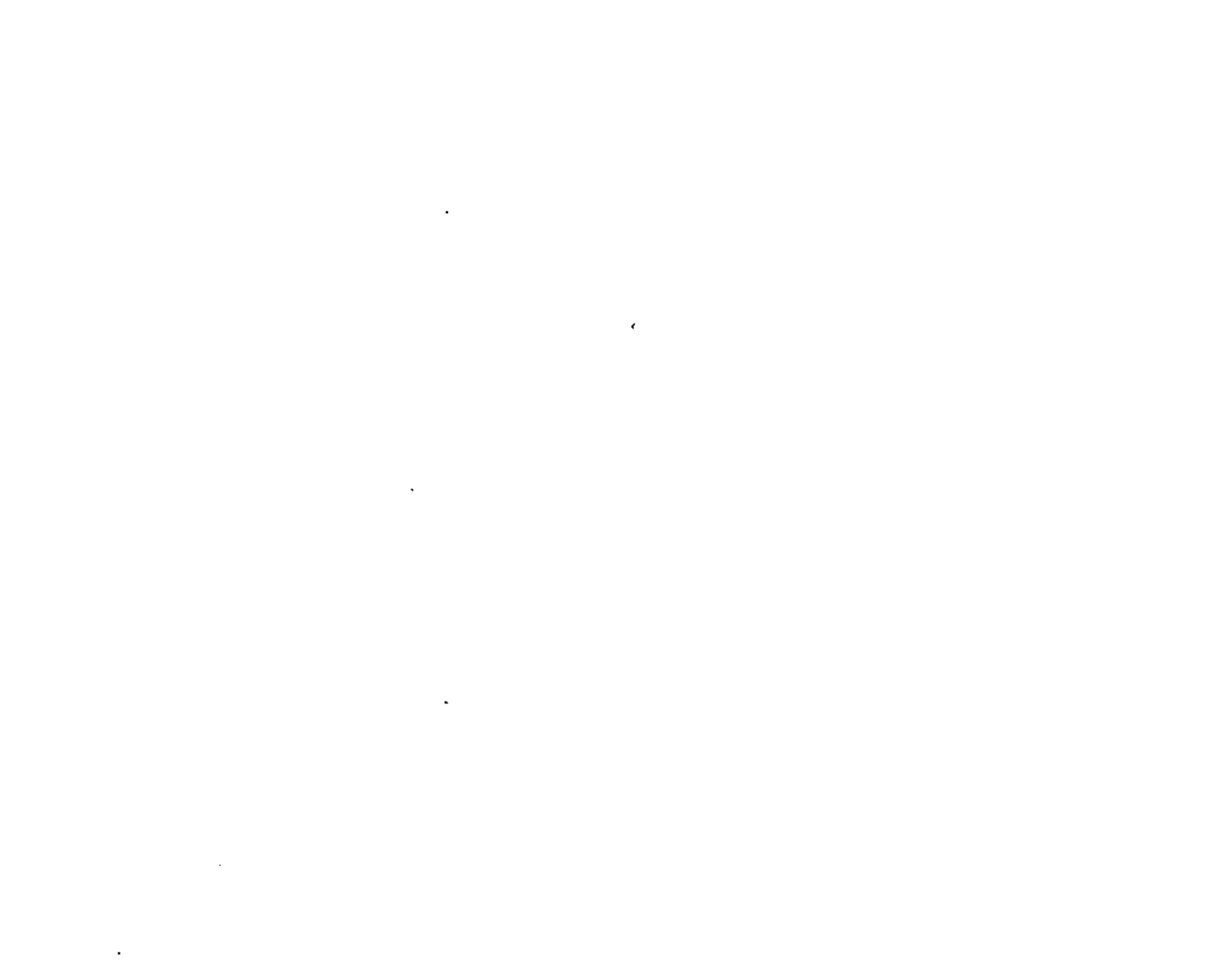


FIG - 3



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

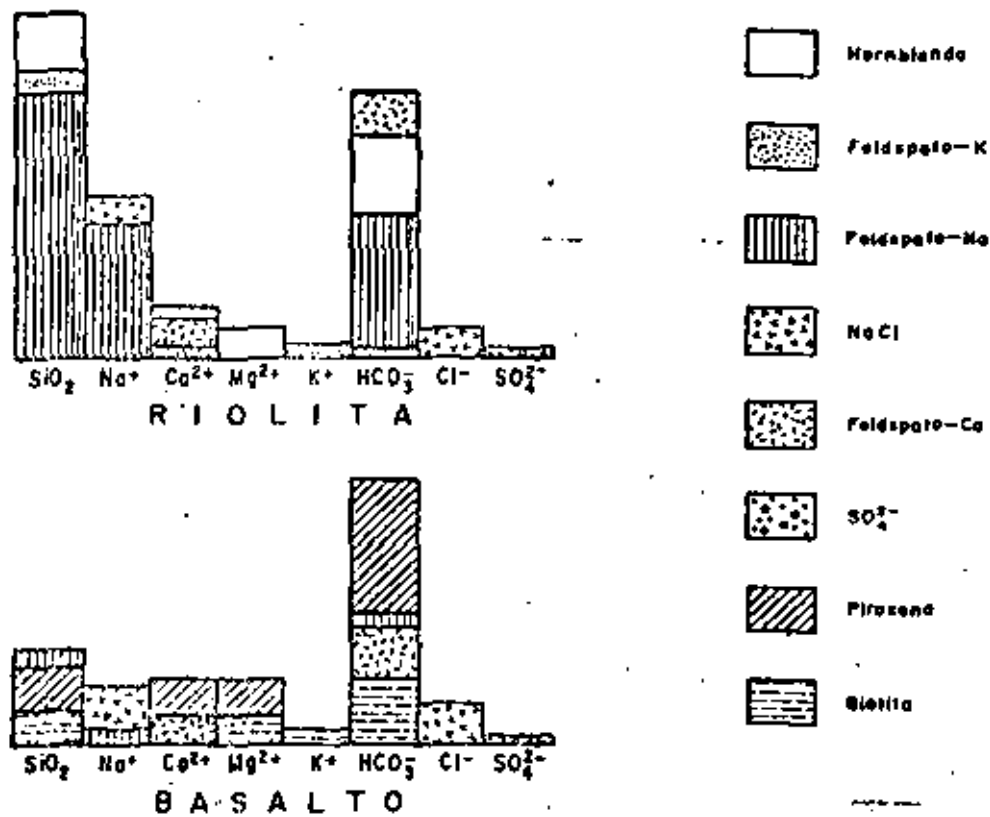
Se efectúa una selección de aprovechamientos, tomando en cuenta una distribución espacial, que dependerá de las circunstancias, así como el tipo de aprovechamiento ya sea pozo, noria, manantial, galería, etc., ya que en ocasiones, los diferentes tipos de aprovechamientos, corresponden a sistemas acuíferos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

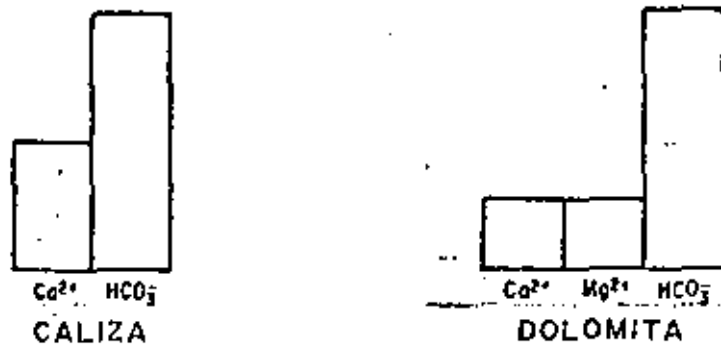
Al obtener la muestra en el campo, se deben tomar datos relativos a la localización y características del aprovechamiento, así como la temperatura ambiente, la temperatura del agua al momento del muestreo, el pH y la resistividad -



COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA
QUE CIRCULA POR DIFERENTES ROCAS

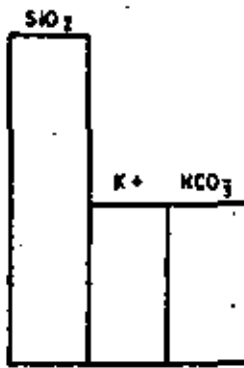


RECONSTRUCCION EN HISTOGRAMAS DE LA COMPOSICION
DEL AGUA DE RIOLITAS Y BASALTOS

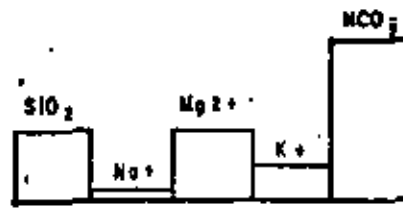


HISTOGRAMAS MOSTRANDO LA COMPOSICION
DEL AGUA DE CALIZAS Y DOLOMITAS

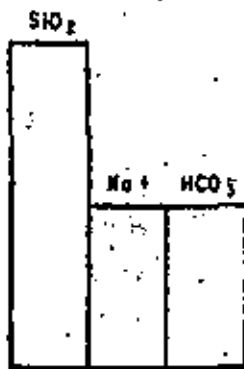
COMPOSICION QUIMICA DE ALGUNOS MINERALES



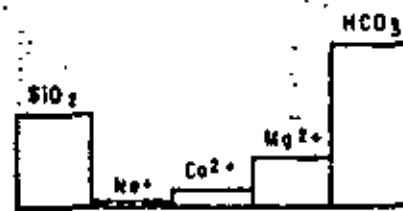
FELDSPATO-K



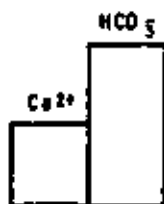
BIOTITA



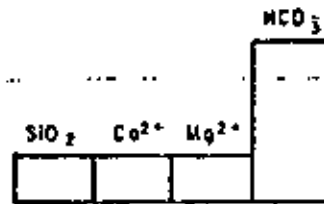
FELDSPATO- Na



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

ANALISIS FISICO - QUIMICOS

ELABORACION DE PLANOS, Y DIAGRAMAS E INTERPRETACION DE LOS MISMOS

- 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 BOTELLA DE POLIETILENO DE UN LITRO DE CAPACIDAD

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

TABLA RESUMEN CONFIGURACIONES DIAGRAMAS-TRIANGULARES ETC.

FIG. 6



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 resume 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 Chuviscar, mostrando que la dirección del agua subterránea es hacia el sureste.

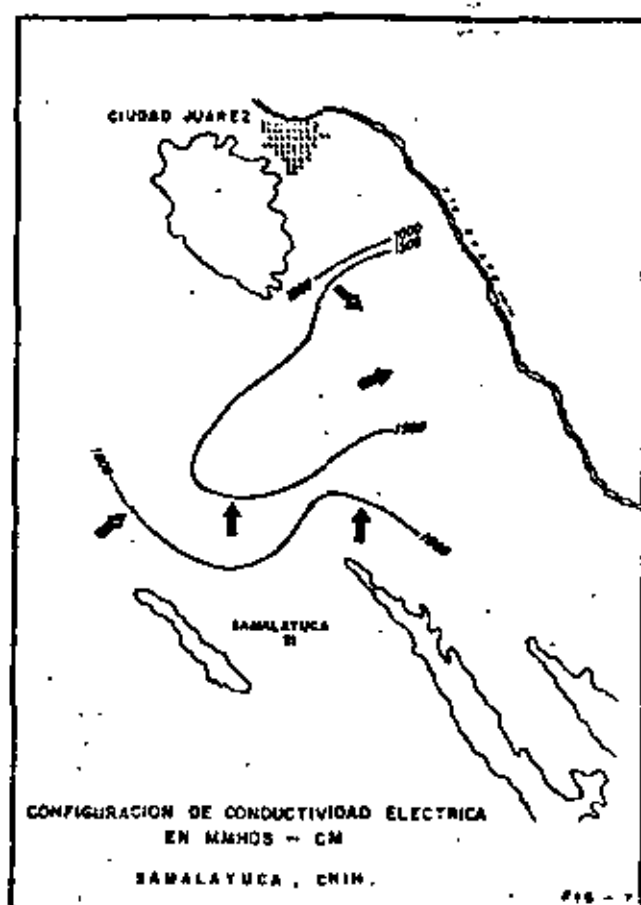
En la configuración de conductividades del área Samalayuca-Juárez, (Fig. 8) se observa la curva 1000 al pie de la Sierra de Juárez y de 1500 hacia el sureste de ella. Esta distribución, indica que la Sierra de Juárez corresponde a una zona de recarga, donde el agua de lluvia se infiltra y fluye hacia 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.

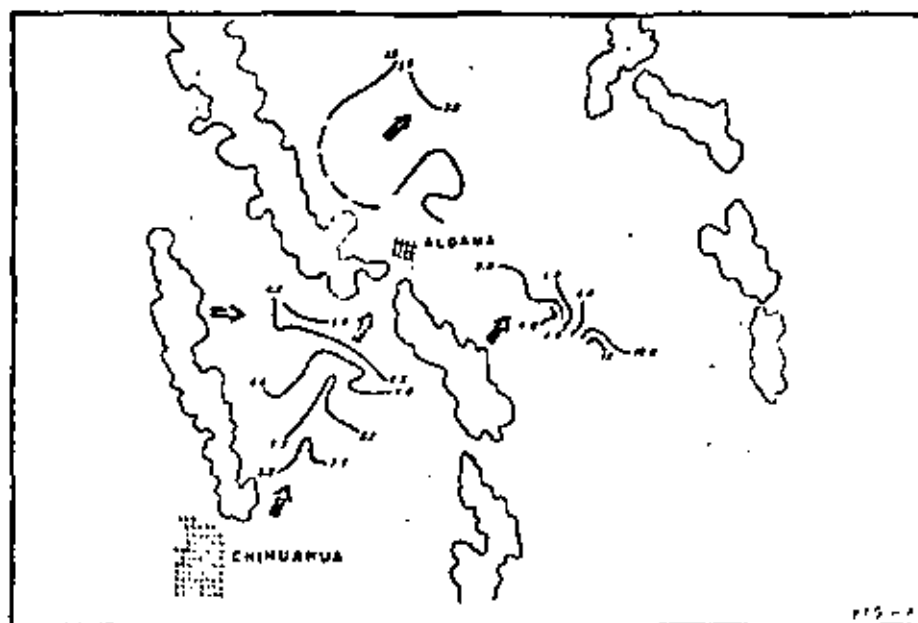
En la Fig. 9 se muestra un corte geológico ilustrativo, que relaciona la zona de recarga y la dirección del movimiento del agua subterránea, con la concentración y composición química del agua.

- 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.L.; CHIHUAHUA-ALDAMA, CHIH.



ZONA DE RECARGA



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

MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRANEA

CURVAS DE IGUAL CONTENIDO DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS

AGUA CALCICA CARBONATADA

AGUA CALCICA MAGNESIANA CARBONATADA

AGUA CALCICA SULFATADA

CALIZAS

DOLOMITAS

YESOS

200

400

600

800

1000

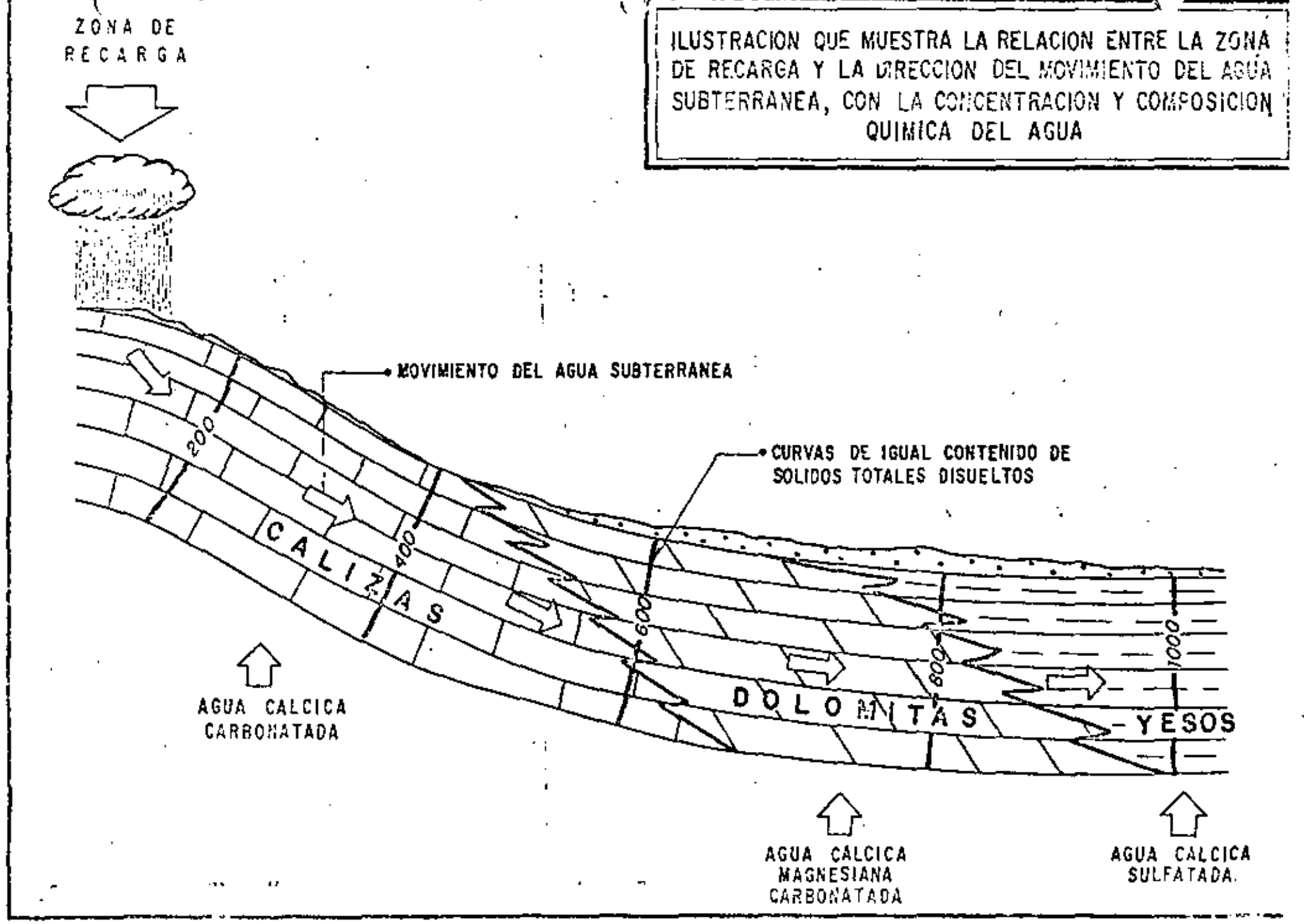


DIAGRAMA TRIANGULAR

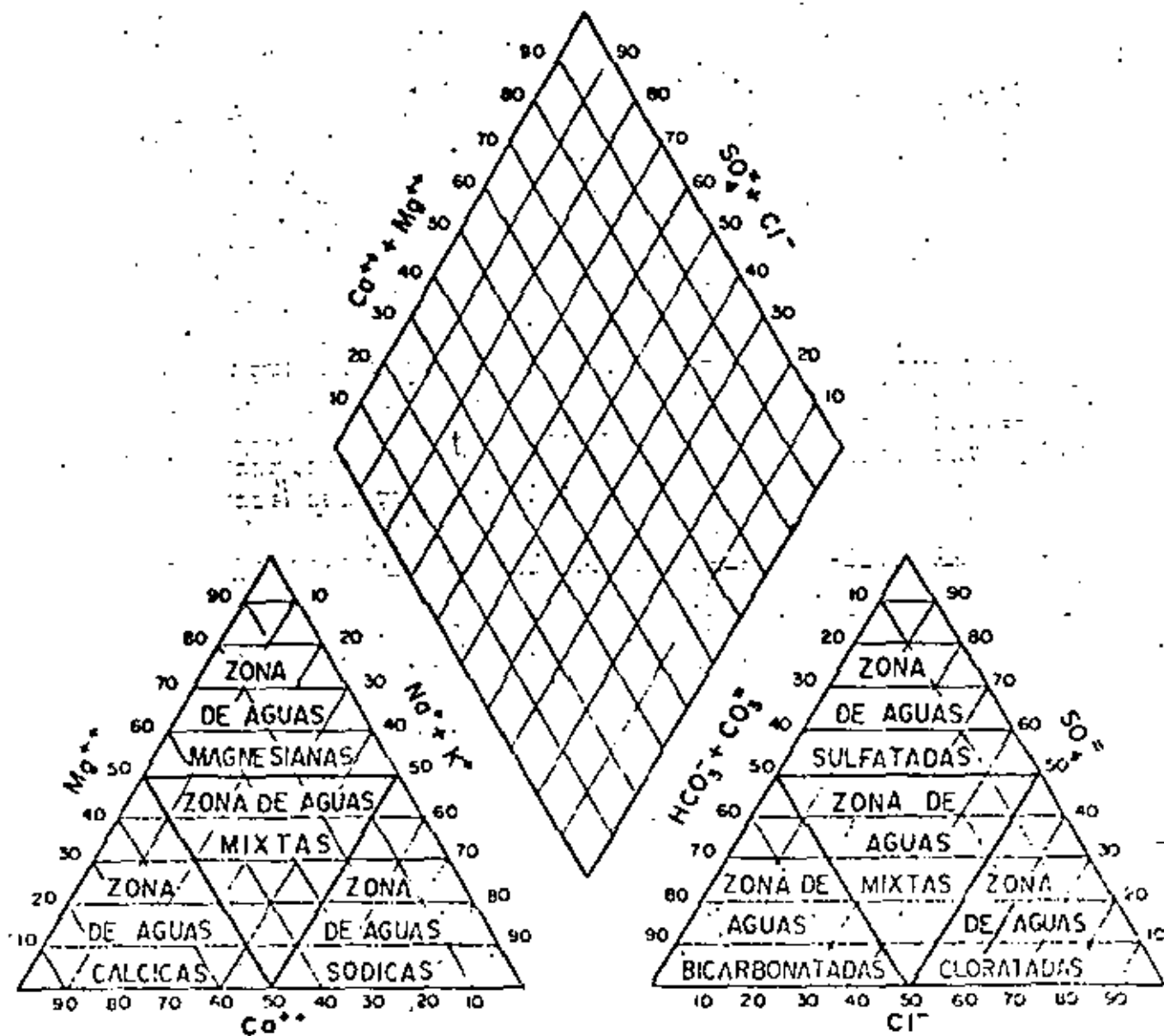


FIG. 10



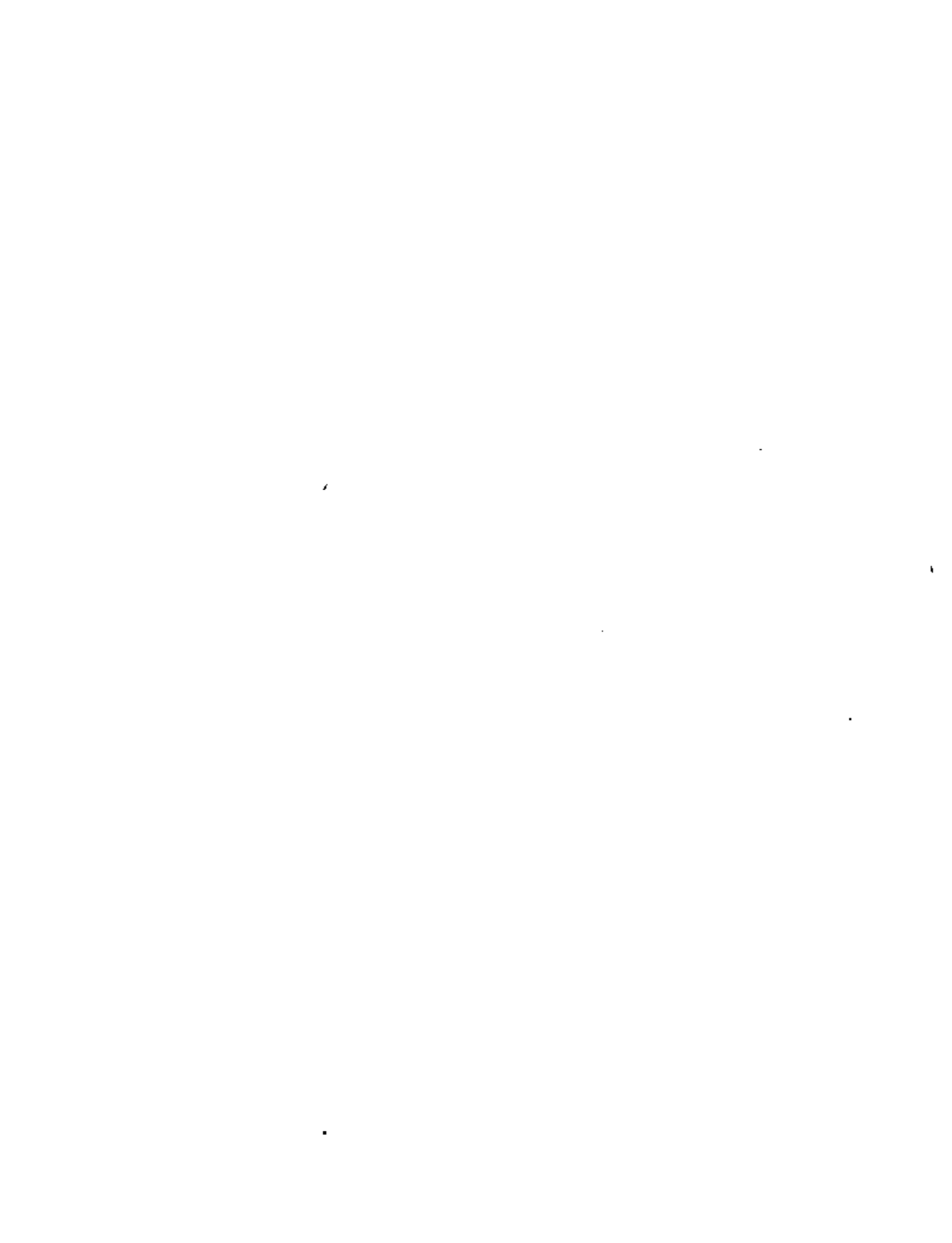
centajes mayores al 50% de calcio, magnesio, bicarbonato, etc., respectivamente. Se define como - - agua mixta, la que se grafica al centro del triángulo, por no existir un ion que predomine.

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 composi-- ción. En la Fig. 12 se muestra el plano correspon-- diente al diagrama triangular de la zona de Tecomán-Manzanillo, en el cual se delimitaron las zo-- nas correspondientes a las familias de agua ya men-- cionadas. El agua sódico-clorada, es consecuen-- cia 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 pre-- domina ningún ion en especial. El agua cálcico-bi-- carbonatada, es el producto de la disolución de ro-- cas 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 propor-- cionales a éstos últimos. Tomando en cuenta esta característica, se forma una gráfica (Fig. 13) con la cual, se pueden calcular resistividades a par-- tir de sólidos totales disueltos, o viceversa. -- Los sólidos totales disueltos calculados, en algunos casos, nos ayudan a complementar la informa-- ción de configuraciones de una forma rápida y eco-- nómica. Las resistividades calculadas, se pueden - utilizar para hacer correlaciones con geofísica .

En la Fig. 17, se muestra un ejemplo de la rela-- ción entre resistividad y S.T.D., el cual corres-- ponde al área de Sonoyta, Son. En ella se encon-- tro que, en ciertos lugares, el agua subterránea - tenía concentraciones de S.T.D., muy altas y se en-- contraba rodeado por pozos con agua de mejor cali-- dad. Se efectuaron sondeos geofísicos de resisti--



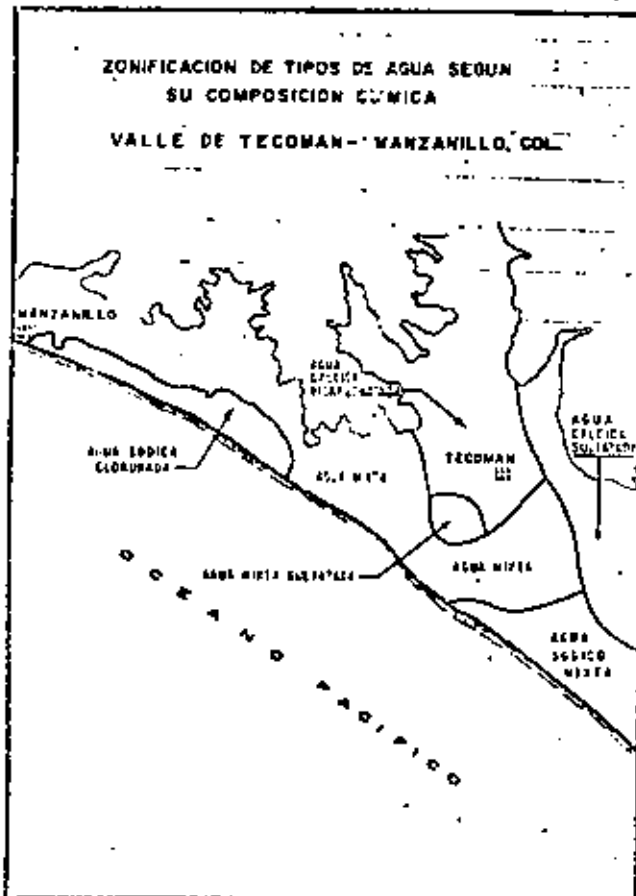
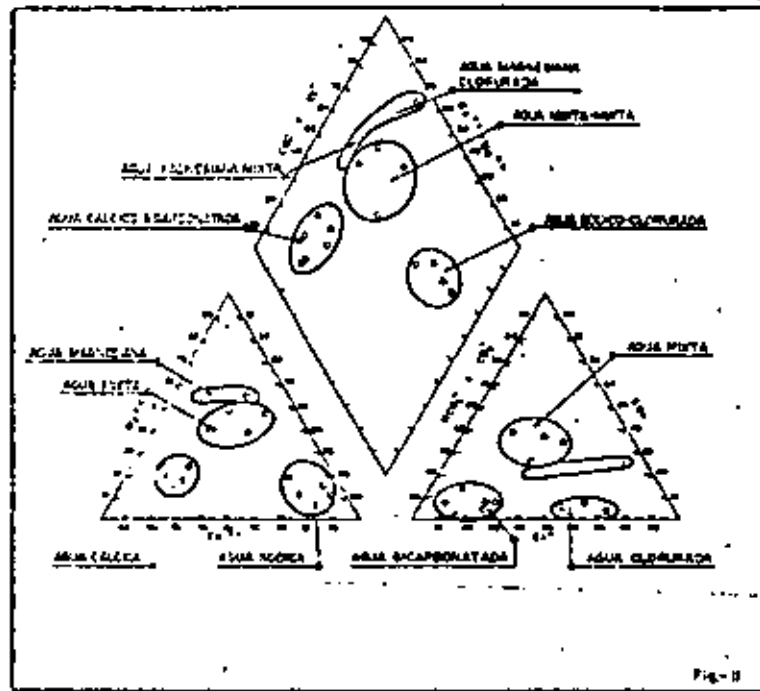


FIG. 12

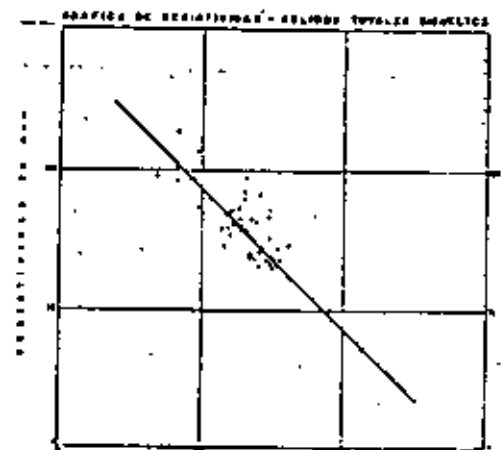


FIG. 13

DETERMINACION DE MANTOS DE AGUA SOBRESATURADOS, POR MEDIO DE GEOFISICA E HIDROGEOQUIMICA

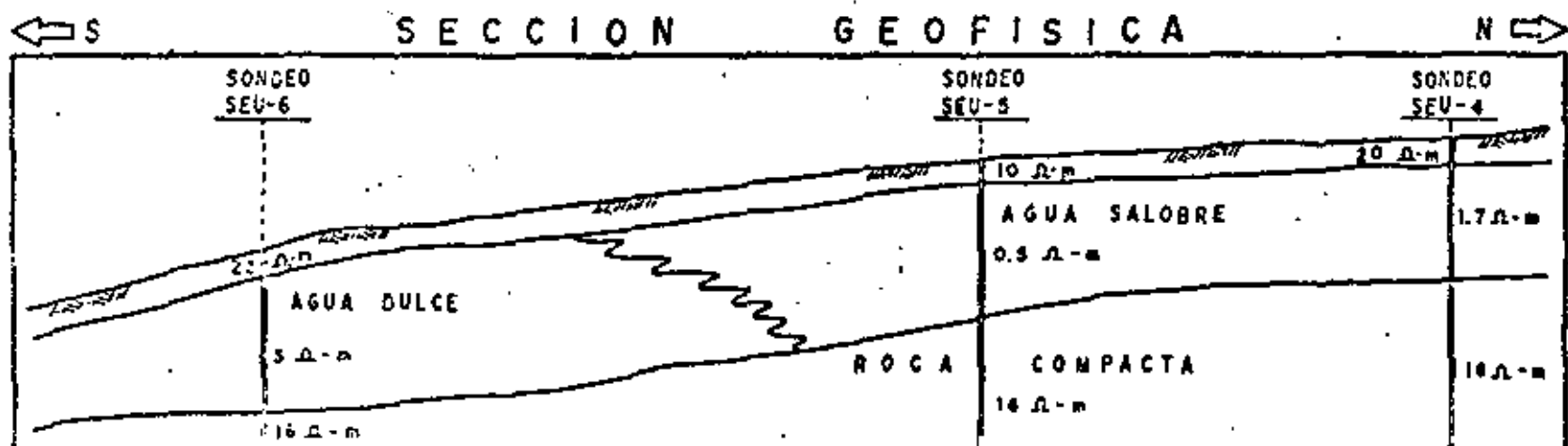
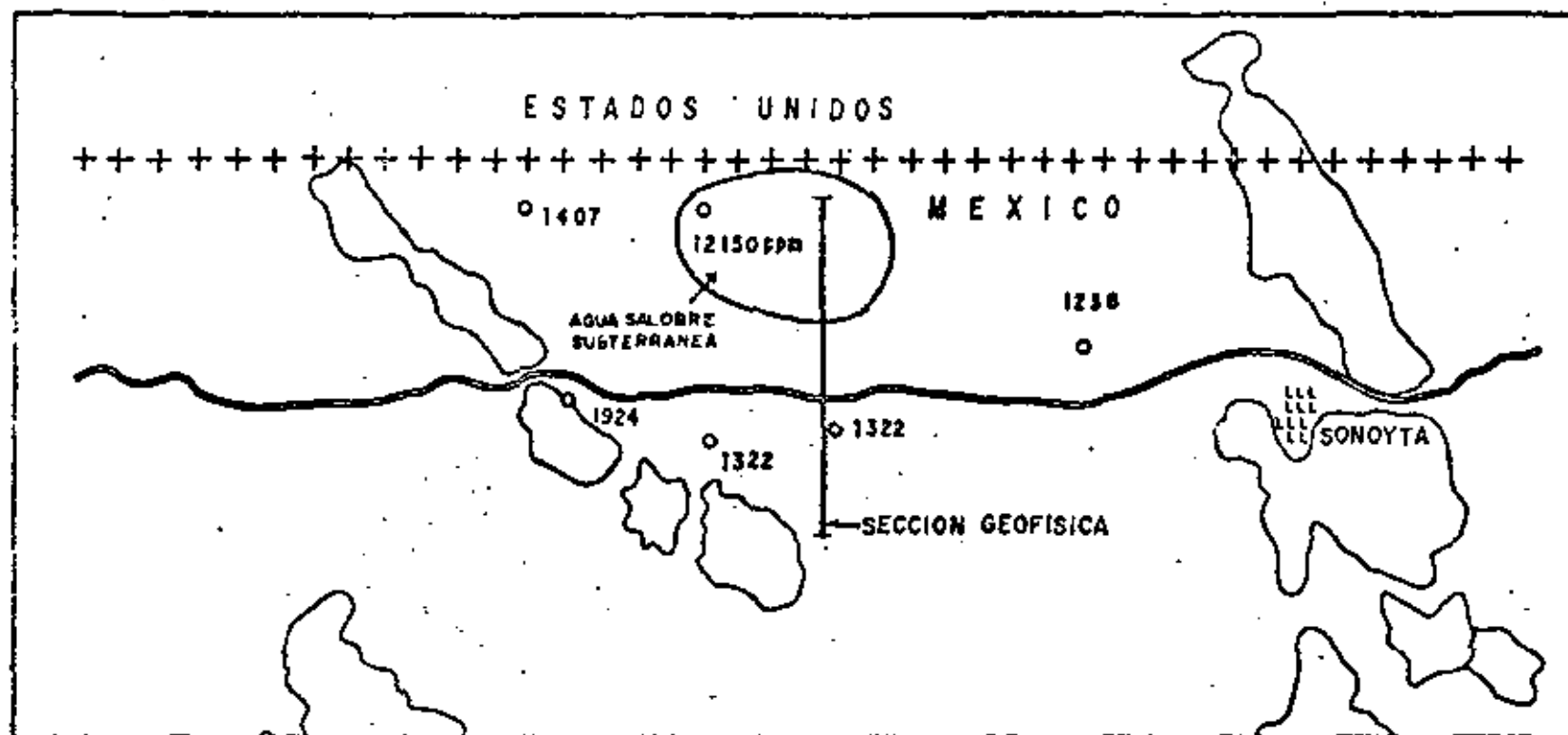


FIG.-17



vidad, los cuales, al ser interpretados, mostraron la existencia de lentes 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.

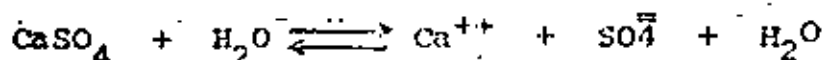
IV. GRADO DE SATURACION DEL AGUA CON RESPECTO A LOS MINERALES MAS COMUNES

Cuando algunas muestras presentan 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 reactivos, o sea:

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

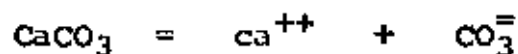
Donde los paréntesis indican la actividad iónica del ion -- que encierran.

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



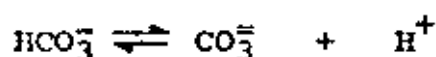
$$K_{ai} = [Ca^{++}] [SO_4^{--}] \text{ - - - - - (1)}$$

De manera similar para la calcita se tiene:



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

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:



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

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).

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

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.

|

|

|

|

.

.

.



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



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

TECNICAS Y PERFORACION

OCTUBRE, 1980

SISTEMA ROTATORIO
CIRCULACION DIRECTA
LODOS DE PERFORACION
PESCAS.

La tecnología de perforación de pozos, (para la exploración y explotación de los recursos naturales yacientes en el subsuelo, - tiene como principal objetivo restablecer el equilibrio mecánico y fisicoquímico que es alterado en las rocas cuando son perforadas, - por los diferentes sistemas mecánicos de perforación.

Uno de los sistemas más desarrollados en la actualidad es el "rotatorio de circulación directa", con el cual se ha logrado la - construcción de pozos de profundidades superiores a 6 000 metros - y por la versatilidad del sistema, se construyeron máquinas con - una gran variedad de tamaños y capacidades.

La construcción de los equipos de perforación se ha venido - mejorando para aprovechar los grandes avances tecnológicos obteni- dos en la fabricación de barrenas del tipo tricónico con toberas - y sus mecanismos se diseñan para lograr mejores avances en la pene- tración de las barrenas tricónicas así como para mejorar la cali- dad de la construcción de los pozos.

En esta breve exposición, el tema acerca del sistema rotato- rio se subdivide en seis partes, las cuales se describen en forma - resumida y serán tratados en forma más amplia, pero objetiva, du- rante el desarrollo de la conferencia, con la ayuda de proyecciones gráficas. La subdivisión se hace de acuerdo a las condiciones me- cánicas del sistema y por su importancia, a continuación se enu- meran:

- 1.- Diseño de barrenas tricónica- con toberas .
- 2.- Presiones de bombeo del fluido de circulación.
- 3.- Uso de lastrabarrenas y estabilizadores.
- 4.- Sistema rotatorio.
- 5.- Fluidos de perforación
- 6.- Avances óptimos

1.- DISEÑO DE BARRENAS CON TOBERAS.

La barrena de tres conos es el elemento cortante y de penetra- ción en las rocas perforadas; sus diseños en la actualidad presentan conos fabricados con dientes cuyas formas, acomodo y calidad de - - - acero, penetran con mayor facilidad en las diferentes durezas de las rocas; los baleros que soportan estos conos, se construyen para so- portar grandes cargas en un sistema de rotación continuo. Por otra- parte, el acomodo y el sistema de toberas se ha diseñado para obte- ner la máxima eficiencia hidráulica del sistema de bombeo, para obte- ner una limpieza del fondo de los pozos perforados, casi instantáneo:



2.- PRESIONES DE BOMBEO DEL FLUIDO DE PERFORACION.

Las bombas de pistón horizontal reciprocante de doble y triple-acción, son las que logran los mejores caudales a las presiones requeridas en los diferentes programas de perforación; el sistema de bombeo se calcula para absorber todas las pérdidas de presión superficiales y de profundidad, con el avance de los pozos, de manera que el cálculo hidráulico busca que la mayor parte de la presión obtenida sea aplicada en la salida de las toberas, para lograr los objetivos de limpieza del fondo del pozo, así como la expulsión al exterior de los detritus cortados, por medio de la más alta velocidad en el espacio anular. Los equipos de bombeo en si se diseñan para aprovechar al máximo la potencia mecánica.

3.- USO DE LASTRABARRENAS Y ESTABILIZADORES.

El empuje mecánico sobre los elementos cortantes lo da el peso de los lastrabarrenas que actúa directamente sobre las barrenas; este empuje es deseable que sea simétrico o sea que la resultante de la sarta de perforación actúe en el eje central que por diseño tienen las barrenas. Para obtener esta simetría, se han diseñado diversos tipos de estabilizadores que, además de mantener las cargas simétricamente, mantienen los pozos en la línea hacia la vertical, así también facilitan que las sargas de perforación se sometan únicamente a esfuerzos de tensión.

4.- SISTEMA ROTATORIO.

La dinámica en la barrena se obtiene por medio de un sistema de rotación continuo que, en combinación con el peso de la "sarta", logran la ruptura de las rocas perforadas; esta rotación continua está gobernada por la dureza de las formaciones geológicas. Por diseño a cada tipo de barrena tricónica se le aplica un número de revoluciones por minuto que puede variar con el peso de los lastrabarrenas aplicado. Los equipos de perforación tienen dispositivos para obtener diferentes velocidades que soporten los esfuerzos de torsión que se crean al rotar todo el conjunto de la "sarta".

5.- FLUIDOS DE PERFORACION

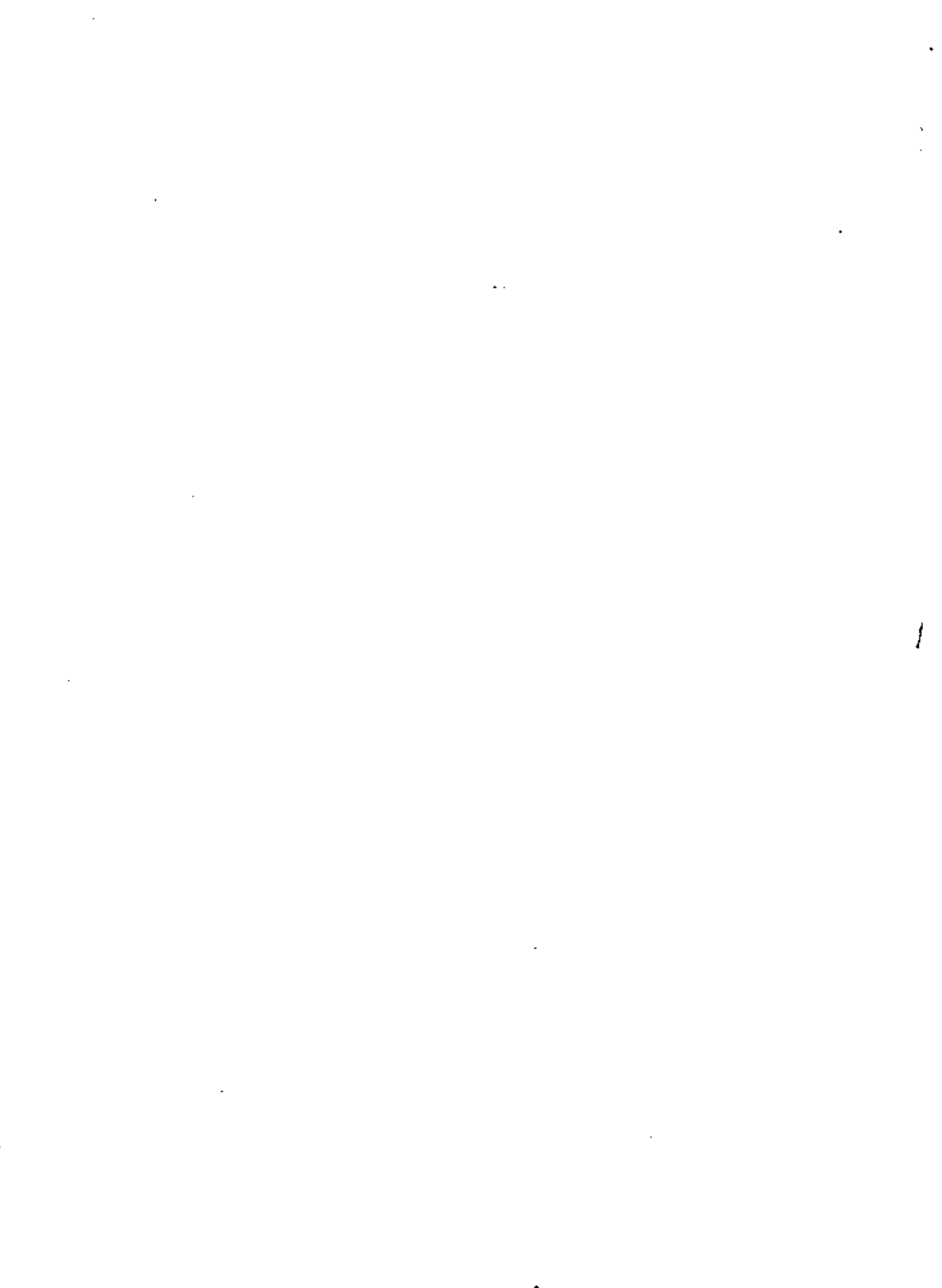
La máxima eficiencia en la circulación de fluidos de perforación se obtiene con el AIRE, en segundo lugar con el AGUA; sin embargo, no en todos los casos se pueden utilizar algunos de estos dos fluidos, teniendo que recurrir a los LODOS DE PERFORACION que han desarrollado una tecnología avanzada para restablecer el equilibrio fisicoquímico que se altera durante la perforación de pozos. Los lodos de perforación pueden ser variados en sus propiedades fisicoquímicas de densidad, viscosidad, gelatinidad, P.H.; así también sus componentes sólidos y líquidos por medio de emulsiones, que en forma adecuada, restituyen las condiciones de equilibrio dentro del pozo y en sus inmediaciones.

6.- AVANCES OPTIMOS.

El avance óptimo medido en metros por hora, con una reducción de costos, se presenta en forma idealizada; la gráfica idealizada se traza con parámetros de perforación de una barrena de tipo adecuado al tipo de formación geológica, operada con un programa hidráulico óptimo y con un trabajo mecánico de peso sobre barrena y revoluciones por minuto máximas, así como con un lodo de propiedades fisicoquímicas que también es óptimo y constante.

PESCAS.

Las operaciones de pesca son accidentes mecánicos, indeseables desde todos los puntos de vista; sin embargo, y a pesar de que hay medidas de prevención, son inevitables, por esta razón: se ha desarrollado una tecnología avanzada para resolver los problemas de pescas que casi se particularizan en cada caso. Por esta razón, de su origen, solución y prevención, se presenta objetivamente un bosquejo general.



nadas en el laboratorio donde las condiciones pueden controlarse, pero la mayoría tiene que relacionarse en el campo, en los trabajos reales de perforación, los cuales están a su vez afectados por circunstancias muy ajenas a la investigación de los diversos parámetros que intervienen en la perforación. Por lo anterior puede decirse que los mayores conocimientos y experiencia provienen de la perforación para la industria petrolera, en la cual no existe, o existe en menor grado la severa presión económica a que está sujeta nuestra industria de perforación somera, principalmente para pozos de agua y minería que no permite llevar a cabo trabajos de investigación. De esta forma observamos que los mayores avances en la tecnología de nuestra perforación somera, ya sea en herramientas, barrenas, equipos, fluidos de perforación, etc., son transferencias y adaptaciones de la tecnología petrolera con una gran diferencia de tiempo en nuestra contra, y es a nosotros los técnicos de la perforación a quienes corresponde hacer llegar al perforador práctico en el campo, lo antes posible, los conocimientos o enseñanzas que le ayuden a desempeñar mejor su cometido.

Entre el gran número de variables que intervienen en la perforación, indudablemente se encuentran las que se refieren a las características y propiedades físicas de las rocas por lo que nos referiremos brevemente a las principales y a su intervención e influencia en la perforabilidad con herramientas del tipo rotatorio y cortadores rodantes en el fondo de la perforación.

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

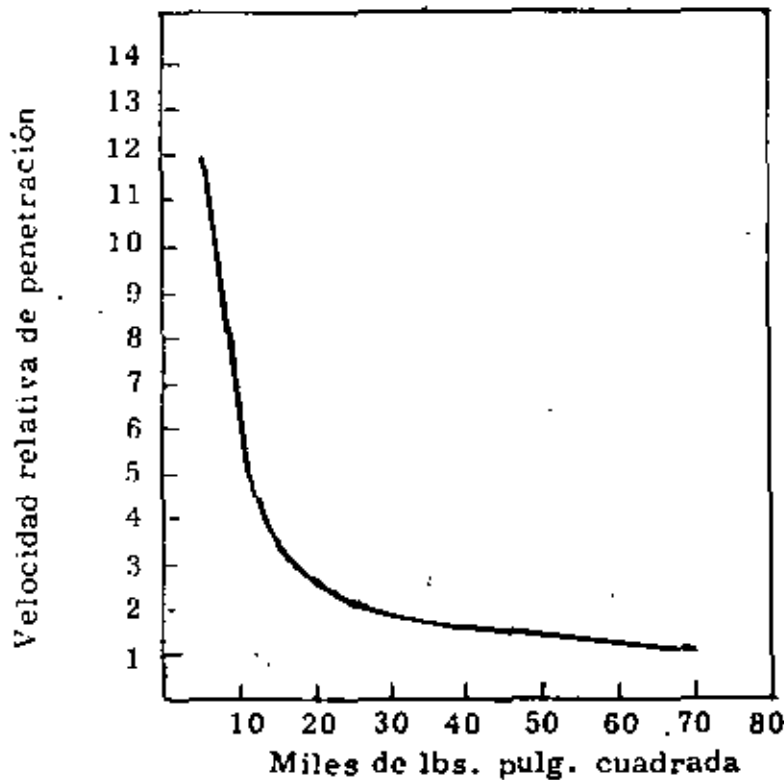
...the ...

...the ...

...the ...

...the ...

...the ...



RESISTENCIA A LA COMPRESION LBS/PULG. CUAD.

idad de material sólido que debe ser removido por la acción de la barrena. -

Desde luego que esta propiedad de las rocas está bien relacionada con la --

velocidad de penetración, aun cuando no pueda hacerse cuantitativamente. -

A título de ejemplo podemos citar la perforación en rocas calizas de gran -

espesor y en corrientes basálticas, en las que pueden percibirse zonas po-

rosas por los mayores avances o velocidades de penetración en comparación

con las zonas en que la roca es masiva.

Teorías relacionadas con la trituración, molienda o falla de las rocas.

Con objeto de tratar de entender la forma en que actúan las barrenas; o yen-

do más allá, el mecanismo por el cual los dientes de la barrena atacan la -

roca, consideramos pertinente examinar aunque sea brevemente las teorías

más conocidas a este respecto.

Cuando se perfora un pozo por medios mecánicos, que es lo que nos ocupa, se producen pequeños pedazos de roca por la acción de la barrena contra la formación.

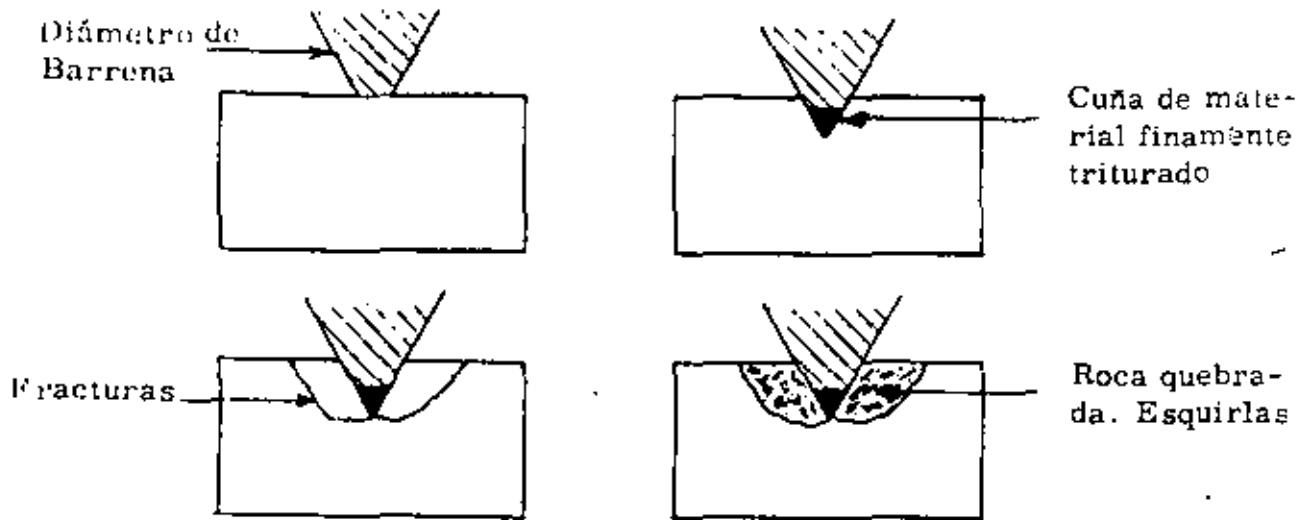
En un intento de obtener un cálculo o estimación del trabajo útil desarrollado por la barrena en la destrucción de la roca, puede suponerse que la energía requerida es proporcional a la nueva superficie de roca producida durante el proceso de perforación. Esta suposición fué usada para obtener la ley de Rittenger, la cual fué desarrollada en principio para su aplicación a máquinas quebradoras de roca. Sin tratar de exponer la secuencia matemática, diremos que se llega a la conclusión siguiente:

$$\begin{array}{l} \text{Trabajo por unidad} \\ \text{de volumen de roca} \end{array} = \frac{\text{constante}}{a}$$

siendo "a" el tamaño efectivo de los recortes de perforación.

Esta relación implica que la energía gastada en la perforación de un metro a determinado diámetro, será inversamente proporcional al tamaño de los recortes. O de otra manera, el tamaño de los recortes nos dá un indicio bastante directo de la perforabilidad relativa de las rocas; es decir, si con la misma barrena y conservando invariables todas las condiciones de perforación, peso, rotación, etc., entre más pequeños sean los recortes la formación requiere más energía y por tanto es más resistente a la perforación. Sin embargo, esto no quiere decir que las condiciones de perforación y destrucción de la roca en las que se requiera el mínimo de energía o trabajo mecánico sean las más deseables o económicas; es decir, que no siempre la obtención de los fragmentos más grandes deba ser el objetivo del perfo-





MECANISMO DE FORMACION DE CRATERES

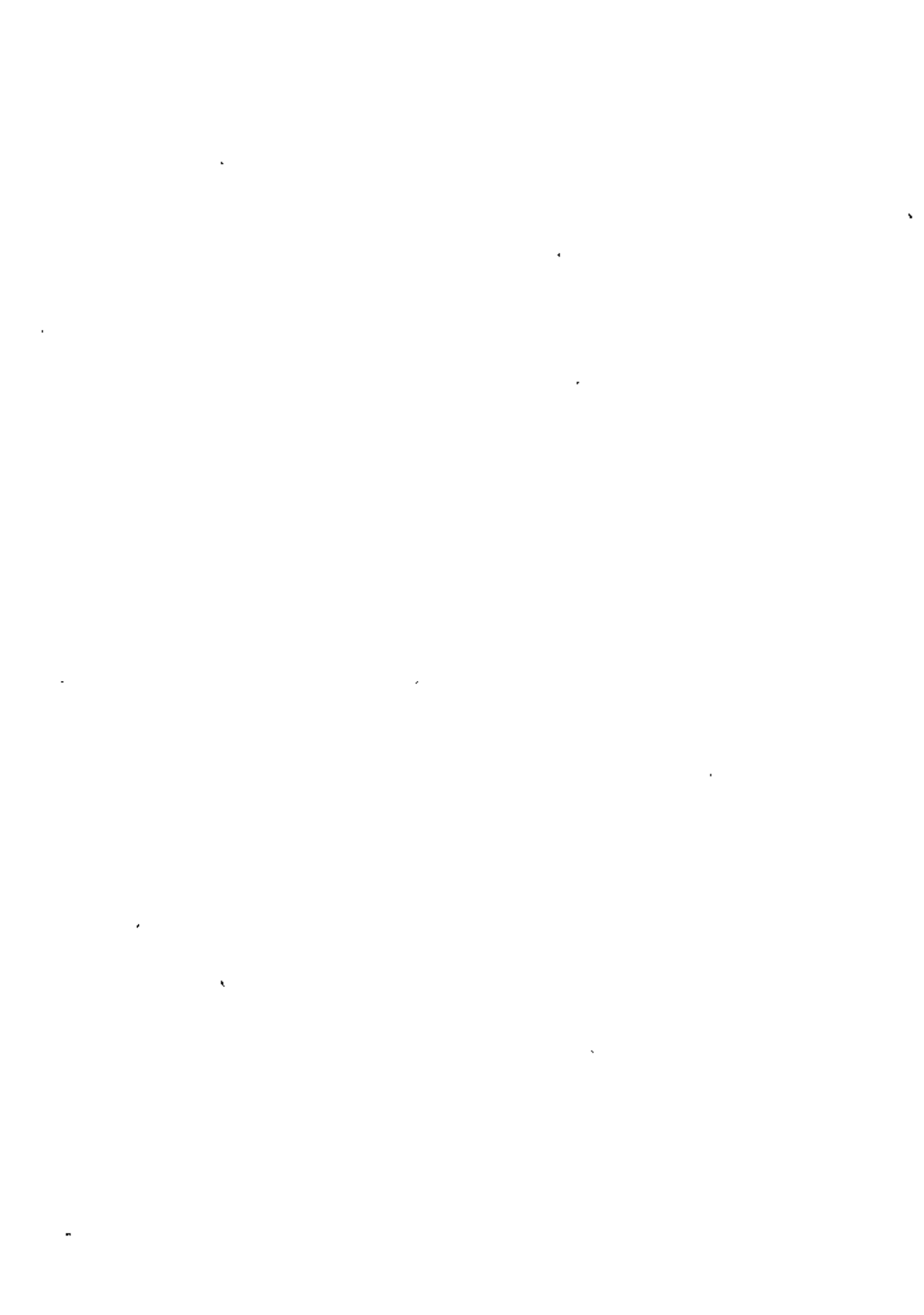
el material sólido que rodea a la cuña inicial.

Cuando estas fuerzas llegan a cierta intensidad se inician fracturas debajo de la cuña y se propagan hasta la superficie de la roca.

Las trayectorias de éstas fracturas intersectan a las líneas de acción de los esfuerzos principales a un ángulo constante como lo predice la teoría de Mohr que se mencionó anteriormente relativa a la máxima diferencia de esfuerzos principales o sea donde ocurre el máximo esfuerzo cortante.

En estos estudios se encontró una correlación entre la profundidad del cráter y la inversa de las importantes propiedades de las rocas como son: La resistencia al corte y la resistencia a la compresión.

Como resultado de todos esos estudios y experimentos Maurer propuso la siguiente importante ecuación, siempre que se den las condiciones de una "perfecta limpieza" del fondo del agujero, es decir, que el material triturado bajo cada impacto de los dientes de la barrena sea removido, inmediatamente, de manera que siempre se produzca el meca-



nismo de craterización sobre roca "virgen". (Esto explica en parte la mayor eficiencia de las barrenas con toberas (jets)).

$$R = K \frac{N W^2}{D^2 S^2}$$

R = rendimiento (pies/hr.)

K = condiciones de perforación (constante)

N = Velocidad rotaria r.p.m.

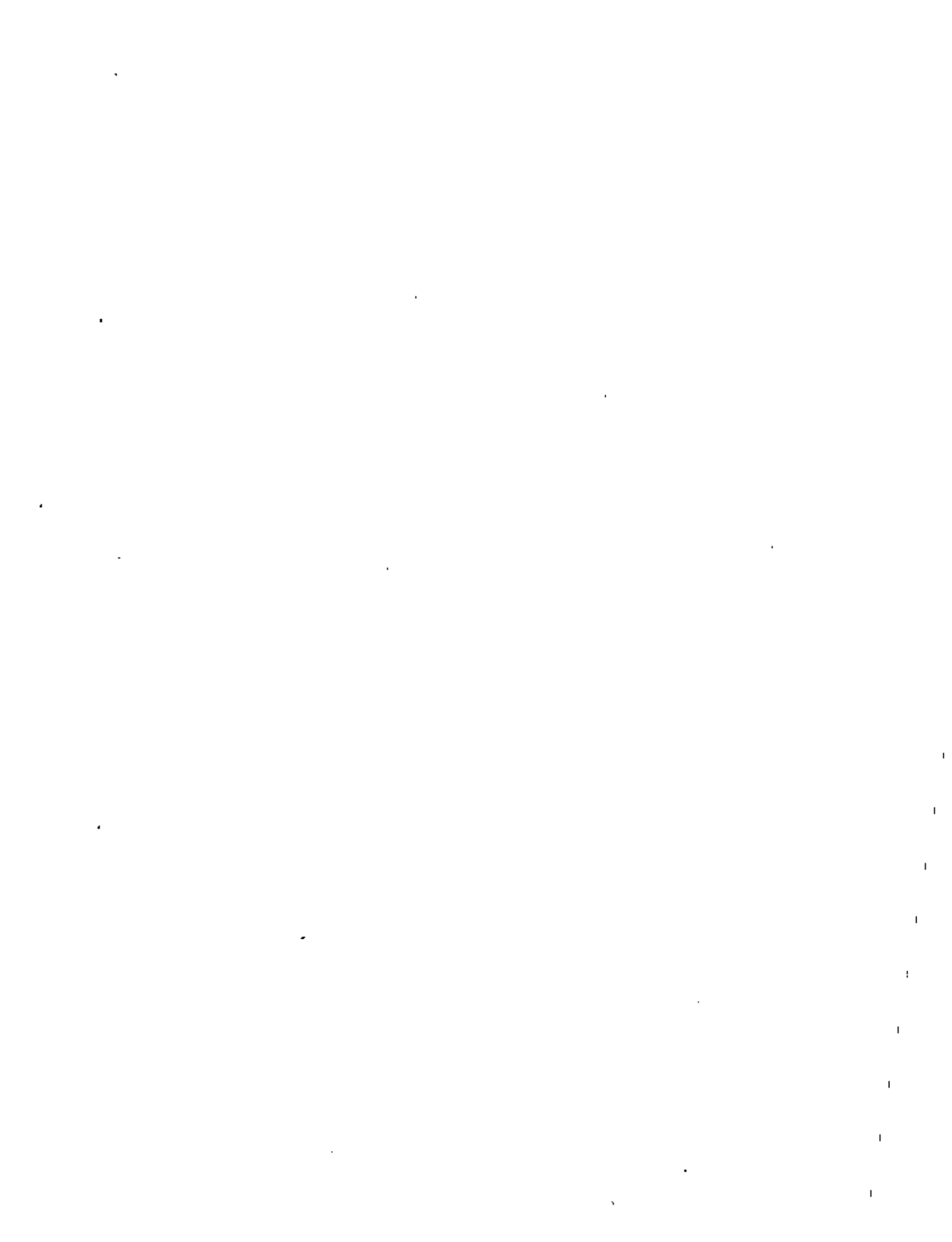
W = Peso total sobre la barrena, Lbs.

D = Diámetro de la barrena, pulgs.

S = Resistencia a la penetración (compresión) de la roca
Lbs/pulg. cuadrada.

Como se vé, la ecuación anterior relaciona cuatro variables de las muy importantes en la técnica y práctica de la perforación. Comentaremos brevemente sobre cada una de ellas. En primer lugar, "S" resistencia a la penetración cuyo índice mas próximo o semejante es la resistencia a la compresión influye en la velocidad de perforación o rendimiento en razón inversa del cuadrado de su valor. Es decir que si una roca "B" es doblemente fuerte o doblemente resistente en comparación con una roca "A", "B" se perforará a una velocidad cuatro veces menor, o -- bien, tomará cuatro veces mas tiempo perforar una misma longitud o tramo de pozo.

Por otra parte, observamos también que la velocidad de perforación es proporcional a la velocidad angular de la barrena, lo cual indica que -- entre ciertos límites, para obtener "limpieza perfecta", el volumen de



roca triturada es proporcional al número de impactos producidos por los dientes de la barrena.

Por otra parte, vemos que el rendimiento es proporcional al cuadrado de "W" o sea al peso total efectivo sobre la barrena y podemos obtener una consecuencia práctica muy útil, que consiste en saber que cualquier cantidad de peso que podamos agregar a la barrena se reflejará grande mente en nuestros rendimientos.

También es importante observar que el rendimiento varía en razón inversa del cuadrado del diámetro, o lo que es lo mismo, varía en función inversa del volumen de roca triturada.

Esta relación es cierta y corresponde a la experiencia dentro de ciertos límites a condición de que se conserven invariables los demás elementos o parámetros que intervienen. Por ejemplo, según la fórmula que comentamos, un agujero de 2" podría perforarse a una velocidad 16 veces mayor que un agujero de 8", lo cual evidentemente no sucede en la práctica por la imposibilidad material de mantener el mismo peso total "W" sobre la barrena, además de otros impedimentos de semejante naturaleza, que hacen que seguramente un agujero de 8" pueda perforarse a mayor velocidad que uno de 2".

Finalmente, el rendimiento está afectado por la constante "K", lo cual representa una manifestación matemática de que muchos otros parámetros pueden afectar la velocidad de perforación, incluyendo otras propiedades de las rocas diferentes a la resistencia a la compresión, las propiedades y características del fluido de perforación empleado,



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



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

COSTOS DE PERFORACION

ING. JOSE LUIS SANCHEZ LAZCANO

OCTUBRE, 1980



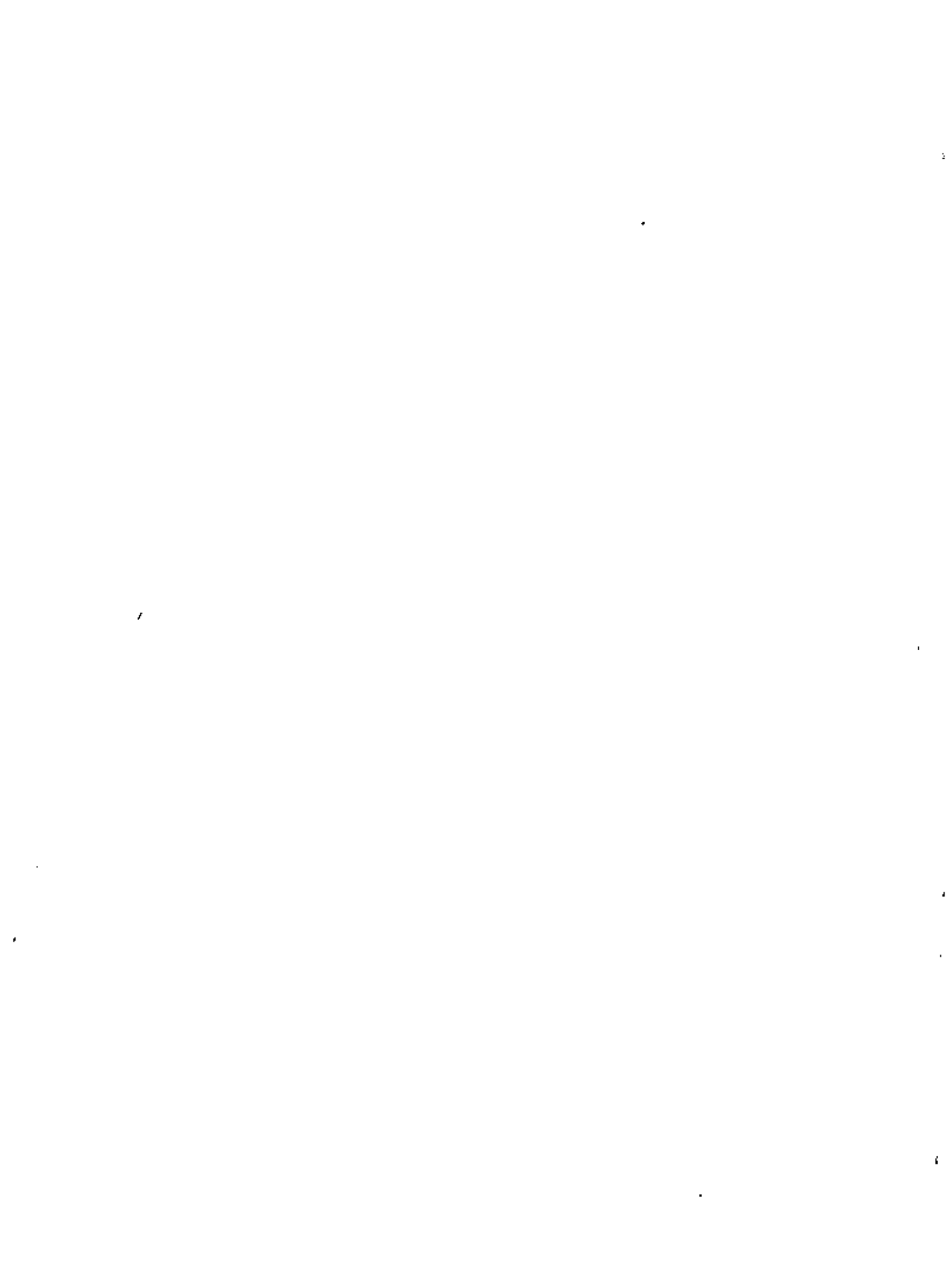
El tema "Costo de Perforación" representa un problema difícil de tratar ya que se utilizan diferentes criterios para el manejo de costos.

Por otra lado existen una gran diversidad de máquinas de perforación las que a su vez emplean diferentes formas de perforar.

El presente trabajo se basó en los criterios de un trabajo que se llevó a cabo en 1973 auspiciado por la Cámara Nacional de la Industria de la Construcción, en el cual participamos un grupo de técnicos en perforación.

En general los criterios son los mismos aunque se utilizan algunos ajustes para adaptar al presente año de 1978 dicho trabajo.

Del índice que adelante se señala solo se desarrolla una parte enfocando directamente a la perforación en sí.



I N D I C E .

	Hoja
Descripción de equipos-tipo para perforación. Cuadro 1	6- 1
Análisis de costos de transporte, instalación y desmantelamiento del equipo de perforación	6- 4
Análisis de costos de construcción de presas para lodos de perforación	6- 7
Análisis de costo del lodo de perforación	6- 8
Análisis de costos de perforación	
Clasificación de materiales	6- 9
Avances teóricos de perforación	6-10
Rendimientos reales de perforación	6-12
Cuadro 2, que los muestra.	6-14
Costos. Incremento por profundidad	6-18
Costos en diámetros básicos, prof. 0 a 100 m. Cuadro 5	6-19
Costos en todos diámetros, prof. hasta 300 m. Cuadro 6	6-19
Costos de perforación con control de verticalidad. Cuadro 7	6-21
Análisis de costos de colocación de tuberías y cedazos. Cuadro 8	6-22
Análisis de costos de cementación de tubería Cuadro 9, que los muestra	6-23 6-26
Análisis de costos de grava para filtros	6-28

Apéndice I.- Salarios reales	6-29
Apéndice II.- Salarios por cuadrillas y seguro social	6-31
Apéndice III.- Cargos fijos de equipos	6-34
Apéndice IV.- Consumos de equipos	6-38
Apéndice V.- Costos horarios de equipos	6-43
Apéndice VI.- Costos horarios de herramienta de ataque	6-45
Apéndice VII.- Costo de herramienta para control de -- verticalidad	6-46



Equipo tipo Para perforar:		I	II	III	IV	V
a) hasta profundidades		100 m	450 m	1500 m	1500 m	2000 m
b) En diámetros de		18" máx.,	avulsos	avulsos	avulsos	avulsos
c) En materiales		suelos y	todos	todos	todos	todos
		semi-suelos				
1	<u>Tipo del equipo</u>	Portátil	Portátil	Portátil o desarmable	Portátil o desarmable	Portátil o desarmable
2	<u>Móvil:</u>	Integral	Integral	Integral o desarmable	Integral o desarmable	Integral o desarmable
	a) Altura	38 pies	58 pies	68 - 95 pies	95 - 136 pies	136 pies
	b) Capacidad en el gancho de levanto	35,000 lbs.	75,000 lbs.	140,000 #	180,000 - 200,000 #	250,000 - 300,000 #
	c) Capacidad estática total	-----	-----	-----	150,000 #	420,000 #
3	<u>Subestructura o plataforma de trabajo</u>	Integral	Integral o desarmable	Integral o desarmable	Desarmable	Desarmable
	a) Altura sobre el suelo	(3 pies) 0.90m	(5 pies) 1.50m	1.80 - 3.50m	3.00 - 3.60 m	3.00 - 3.60 m
	b) Capacidad para estibar tubg baria de perforación	-----	500m - 3 1/2"	1000m - 3 1/2"	1500m - 4 1/2"	2000m - 4 1/2"
	c) Capacidad para manejar tubg ria de revestimiento	20,000 #	60,000 #	120,000 #	150,000 - 180,000 #	100,000 - 150,000 #
	d) Capacidad total para tuberías de revestimiento y estiba de tubería de perforación simultá- neamente.	-----	75,000 #	200,000 #	300,000 #	400,000 #
4	<u>Molacete (drawworks),</u>	Integral.	Integral.	Integral.	Integral o desarmable	Integral o desarmable
	a) Diámetro del cable mínimo	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1-1/8"
	b) Freno	Fricción	Fricción	Fricción y enfri- miento	Fricción, Hidráulico y Enfriamiento	Fricción, Hidráulico y Enfriamiento
5	<u>Mesa rotatoria</u>	Integral	Integral	Integral o desarmable	Desarmable	Desarmable
	a) Abertura, mín.	21 1/2" - 16"	18"	18"	20-1/2"	23"
	b) Capacidad de carga estática	15 Ton.	110,000 #	200,000 #	450 Tons.	450 Tons.
	c) Capacidad de carga con rotación	10 Ton.	60,000 #	170,000 #	280 Tons.	300 Tons.
6	<u>Junta giratoria (swivel)</u>					
	a) Capacidad carga estática	15 Ton.	100,000 #	200,000 #	150 Tons.	200 Tons.
	b) Capacidad carga en rotación	10 Ton. 15 Ton.	60,000 #	150,000 #	100 Tons.	135 Tons.
7	<u>Equipo de bombeo de lodos de perforación.</u>	Integral.	Integral o Independiente	Independiente	Independiente	Independiente
	a) Capacidad de bombeo.	150 GPM	400-200 GPM	450-200 GPM	400 GPM 220 GPM	450 GPM 320 GPM
	b) Presión de bombeo	200 lbs.p.s.c.	2500 5000	4500 10000	5500 12000	5500 12000
	c) Número de Unidades	1	1	1	2	2
8	<u>Potencia en el equipo de perforación</u>					
	a) Molacete, rotaría y equipo de bombeo	110 H.P.	-----	-----	-----	-----
	b) Molacete y rotaría	-----	150-200 HP	300 HP	350 - 500 HP	600 - 800 HP
	c) Equip. de bombeo	51 H.P.	150-200 HP	150-250 HP	400 - 600 HP	470 - 600 HP



ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

ENERO DE 1973. - DESCRIPCION DE EQUIPOS - TIPO PARA PERFORACION (CONTINUACION)

CUADRO I

	I	II	III	IV	V
9 <u>Utiles y herramienta de piso</u>					
a) Llaves rotativas para tuberías de perforación	X	X	X	X	X
b) Llave para tuberías de perforación	X	X	X	X	X
c) Llave para lastre barrenos	X	X	X	X	X
d) Llave para tuberías de perforación	X	X	X	X	X
e) Colador para lastre barrenos	X	X	X	X	X
f) Equipo automático para apretar y aflojar tuberías	---	X	X	X	X
g) Cuadro para apretar y aflojar barrenos	---	X	X	X	X
h) Indicador de peso	Hidráulico	Hidráulico	Hidráulico	Hidráulico	Hidráulico
i) Manómetro	---	X	X	X	X
j) Laboratorio portátil para control de lodos	---	---	X	X	X
k) Elevadores para tuberías de revestimiento con rosca y copia	---	X	X	X	X
10 <u>Equipo para el circuito de lodos</u>					
a) Presas de lodos	En tierra (5 m ³)	En tierra (30 - 50 m ³)	En tierra Metálicas (60 m ³)	Metálicas (90 m ³)	Metálicas (90 m ³)
b) Mallas vibratorias	---	---	---	X	X
c) Desarenador	---	---	---	X	X
d) Pistolas para mezcla	1 bajo presión	2 - 200 #	4 - 200 #	8 - 200 #	8 - 200 #
e) Mudo mezclador	Rudimentario	Formal	Formal	Formal	Formal
f) Tubería, conexiones y mangueras en el circuito de presión	2" - 4000'	2 1/2" - 3" 18000'	3 1/4" - 20000'	4" - 30000'	4" - 30000'
11 <u>Instalación eléctrica</u>					
Intemperie					
a) Iluminación de piso y mástil	X	X	X	X	X
b) Iluminación de la subestructura	---	X	X	X	X
c) Iluminación del circuito de lodos	---	X	X	X	X
d) Iluminación de vestíbulos según reglamento de aeronáutica	---	---	---	X	X
e) Iluminación de todo el área de trabajo	---	---	---	X	X
12 <u>Equipo de pesta</u>	X	X	X	X	X
13 <u>Tanques almacenamiento de combustible</u>	1000 lts.	3000 lts.	5000 lts.	10,000 lts.	10,000 lts.
14 <u>Tanques almacenamiento de agua</u>	---	---	X	X	X

(*) Debe existir, se especificará en los análisis correspondientes.

(2) EQUIPO COMPLEMENTARIO

	I	II	III	IV	V
1 <u>Planta eléctrica</u>					
a) Iluminación	2 KW.	5 KW.	10 KW.	15 KW.	15 KW.
b) Fuerza eléctrica	- - -	- - -	10 KW.	15 KW.	15 KW.
c) Capacidad total	2 KW.	5 KW.	20 KW.	30 KW.	30 KW.
2 <u>Planta de soldadura eléctrica</u>					
Capacidad	300 A	300 A	300 A	300 A	300 A
3 <u>Bomba centrífuga</u>	X	X	X	X	X
4 <u>Equipo de soldadura autógena</u>	X	X	X	X	X
5 <u>Equipo de maniobras</u>					
a) Camión de carga	6 Ton.	- - -	- - -	- - -	- - -
b) Camión de maniobras, con - pluma, melacete y rodillo	- - -	20 Ton.	20 Ton.	30 Ton.	30 Ton.
c) Plataforma de carga	- - -	20 Ton.	20 Ton.	30 Ton.	30 Ton.
6 <u>Lote de herramientas</u>	X	X	X	X	X

(3) HERRAMIENTA DE PERFORACIÓN

	I	II	III	IV	V
1 <u>Columna de perforación</u>					
a) Tuberia de perforación	3 1/2"-125m	4 1/2"-31/2-600m	4 1/2"-31/2-1250m	4 1/2"-1700m	4 1/2"-2200m
b) Lectora barrenas	5 1/2"-20'	5 1/2"-73/4"	5 1/2"-73/4"	6-1/4"-73/4"	6-1/4"-73/4"
c) Peso Olli sobre barrenas	3 Ton.	10 Ton.	12 Ton.	16 Ton.	16 Ton.

(X) Debe existir; se especificará en los análisis correspondientes.

Se toma en definitiva como base de cálculo un equipo rotatorio tipo 2000 como indicada para la determinación de costos genéricos de perforación a profundidades hasta de 300 m en diámetros usuales, costos válidos, por representativos, independientemente de que se empleen otros tipos de equipos para perforar.

ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - AGOSTO DE 1978.

TRANSPORTE, INSTALACION Y DESMANTELAMIENTO DEL EQUIPO DE PERFORACION.

EQUIPO DE PERFORACION MODELO 2000 O SIMILAR

A.- Movilización del equipo hasta una distancia de 15 km (por carreteras, caminos, terracerías o brechas transitables en todo tiempo).

Peso de la unidad perforadora 20,000 kg.

Peso del equipo auxiliar, tubería de perforación y accesorios 18,000 kg.

Se necesitan dos unidades automotrices para 20 t cada una, un tractor (quinta rueda) y un tractor y plataforma para 20 t.

Renta de este equipo \$ 700.00/h

Se considera que las maniobras de carga y descarga se hacen con el personal del equipo de perforación y que la maniobra de cargar transportar a una distancia no mayor de 15 km y descargar, requiere 8 horas de trabajo.

1.- Renta del equipo de transporte:

8 h a \$ 700.00/h \$5,600.00

2.- Equipo de perforación:

8 h máquina parada a \$ 957.02/h 7,656.16
(Apéndice V)

3.- Llantas del equipo de perforación:

(Apéndice IV - \$ 20.00/h)

\$ 20.00/h x 15 km = 30.00
10 km/h

4.- Instalación y desmantelamiento

Los trabajos de instalación consisten en:

ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - AGOSTO DE 1978.

TRANSPORTE, INSTALACION Y DESMANTELAMIENTO DEL EQUIPO DE PERFORACION.

(CONTINUACION)

a)	Limpieza y nivelación del terreno (pera)	3h
b)	Montaje del equipo sobre su cama de - - madera	1h
c)	Erección del mástil, centrado y nivela ción	4h
d)	Instalación de la bomba y conexiones - del circuito de lodos	3h
e)	Instalación del equipo auxiliar	1h
f)	Perforación del agujero auxiliar para la flecha (kelly)	10h
g)	Preparación inicial de lodos (20 m3)	6h
h)	Armado de flecha, barrenas, rotaria, lubricación inicial, dotación de com- bustible y prueba de mandos	<u>2h</u>
		30h

Los trabajos de despantelamiento consisten en:

a)	Retiro de tubería de perforación, las - trabarrenas, conexiones y accesorios	3h
b)	Limpieza superficial del equipo	1h
c)	Retiro de la flecha y funda de flecha del agujero auxiliar	1h
d)	Abatimiento del mástil y quitar gatos de montaje	2h

ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS
 EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA
 C.H.I.C. - AGOSTO DE 1978.

TRANSPORTE, INSTALACION Y DESMANTELAMIENTO DEL EQUIPO DE PERFORACION.

(CONTINUACION)

e)	Quitar conexiones de la bomba y circuito de lodos	2h	
f)	Recolección de madera de la cama, tuberfa y accesorios. Preparación para su carga y abandono de la lo- calización	3h	
g)	Tapado de presas y limpieza del lugar	4h	
		16h	
	Total instalación y desmantelamiento:	46h	
	46h máquina parada \$ 957.02 \$/h =		<u>44,022.92</u>
	Total movilización del equipo hasta una dis- tancia de 15 km		\$ 57,309.08
B.-	Transporte del equipo de perforación por km sub- secuente a los primeros 15 km		
	Cargos durante el transporte: \$/h		
	Equipo de transporte	700.00	
	Máquina parada	957.02	
	Mano de obra del equipo de perf.	30.00	
		<u>1,687.02</u>	
	Cargo por km subsecuente en terracerfa o brecha \$ 1,687.02/h : 10 km/h =		\$ 168.70/km
	Cargo por km subsecuente en carretera \$ 1,687.02/h : 40 km/h =		\$ 42.17/km

ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. AGOSTO DE 1978.

CONSTRUCCION DE PRESAS PARA LODOS DE PERFORACION

Se requieren dos presas de lodos de 4 x 4 x 1.5m con 24 m3 de capacidad cada una.

Excavación:

48 m3 x \$ 38.00/m3 = \$ 1,824.00

Relleno semicompactado

48 m3 x \$ 22.00/m3 = 1,056.00

Impermeabilización con suelo-cemento

o cemento-bentonita

8 (4m x 1.5m) + 2 (4m x 4m) =

= 80 m2 x \$ 10.00/m2 = 800.00

Total costo = \$ 3,680.00



ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - AGOSTO DE 1978.

COSTO UNITARIO DEL LODO DE PERFORACION

BENTONITA:

Se considera que para preparar un m³ de lodo

se necesitan agregar 60 kg de bentonita de

buena calidad.

Precio de la bentonita: \$ 700.00/t L.A.B. centro de producción;

60 kg/m³ de lodo x 0.70 \$/kg. = \$ 42.00

Cargo por equipo modelo 2000 ó similar:

Para preparar 48 m³ de lodo (capacidad

de las presas), se utiliza el equipo durante

4 h

$$\frac{4h \times \$ 1,373.85/h (Ap.V)}{48 m^3} = \$ 114.48$$

Costo total \$ 156.48

NOTA:

No se incluye costo de acarreo de bentonita ni de agua.



ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - ENERO DE 1973.

ANÁLISIS DE COSTOS DE PERFORACION

CLASIFICACION DE MATERIALES

Los materiales se clasifican aquí convencionalmente atendiendo no sólo a su denominación geológica sino a características físicas y a las dificultades específicas que presentan a la perforación.

MATERIAL	I.	Arcillas Arenas y gravas hasta \varnothing 5 cm (2") Limos. Tobas. Depósitos lacustres. Pómez, tezontle, lapilli y cenizas volcánicas.
MATERIAL	II.	Areniscas. Conglomerados. Lutitas. Pizarras. Calizas y dolomitas. Rocas ígneas y metamórficas alteradas hasta una dureza similar a la de las Lutitas. Aluviones ("Boleos") hasta de \varnothing 12.5 cm (5").
MATERIAL	III.	Aluviones gruesos sueltos de más de \varnothing 12.5 cm (5"). Aglomerados volcánicos. Rocas ígneas intrusivas y extrusivas. Gneiss y esquistos sanos. Calizas silicificadas. Tobas vitrificadas.



ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS
EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA
C.N.I.C. - ENERO DE 1973.

ANALISIS DE COSTOS DE PERFORACION

AVANCES Y RENDIMIENTOS

AVANCES TEORICOS DE PERFORACION

Es indudable que la perforación de las rocas, suelos y formaciones geológicas en general entraña una mecánica extremadamente compleja en la que entran en juego numerosos factores cualquiera que sea el procedimiento o método de perforación: percusión con cable, percusión-con aire y rotación, o el más generalizado que es el rotatorio utilizando lodos de perforación.

Entre los factores más importantes que afectan la velocidad de perforación -- están las características propias de las rocas como son su dureza, su resistencia a la compresión, su fragilidad, su tenacidad, su plasticidad, que en suma resultan en mayor o menor facilidad o dificultad para ser penetradas.

Los demás factores básicos, tratándose del método rotatorio, son desde luego la potencia disponible o aplicada a las herramientas de perforación; el peso total o por unidad de sección del agujero, el cual a su vez está relacionado con el diámetro efectivo de la perforación, clase, tipo y condición de desgaste de la broca o barrena con que se ataca la molienda de la roca en el fondo del pozo; la velocidad y las características de los fluidos empleados en la perforación.

En estos muchos años se han venido estudiando todos los factores mencionados, principalmente en la industria petrolera, tanto mediante estudios sean teóricos sean experimentales en laboratorios, como en la perforación real de los pozos, con los fines obvios de mejorar la tecnología y la eficiencia y disminuir los costos de perforación. En todos estos trabajos se han correlacionado los resultados de laboratorio y los de campo con el fin de llegar a expresiones matemáticas que conjuguen, en lo posible, los factores que intervienen para comprender mejor la mecánica del proceso.

Entre los trabajos más serios y confiables que existen al respecto están los del ingeniero y profesor W.C. Maurer cuyas conclusiones y experiencias son -- aceptadas por los profesionistas que estudian la tecnología de la perforación.

La fórmula fundamental de Maurer es la siguiente:

$$V = K \frac{HW^2}{D^2 S^2} \quad \text{--- (1)}$$

(1) Citada por Richard D. Campbell, N.W.W.A. Director of Research, en "The water well construction technology". Water well journal. Columbus, Ohio, Abril de 1972.

ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - ENERO DE 1973.

ANÁLISIS DE COSTOS DE PERFORACION (CONTINUACION)

en la cual:

V = Avance en unidades de longitud por hora.

K = Constante que se refiere a la perforabilidad de la roca de que se trate.

N = Velocidad angular o rotatoria en r.p.m.

W = Peso total aplicado sobre la barrena.

D = Diámetro de la perforación.

S = Resistencia de la roca a la compresión.

En la fórmula anterior puede verse que para unas condiciones mecánicas N, W, y para un diámetro D, constantes, el avance de la perforación está determinado fundamentalmente por la resistencia de la roca a la compresión y varía, en razón inversa del cuadrado de esa resistencia. Es decir, que en idénticas condiciones mecánicas, al encontrar una roca con el doble de resistencia, el avance por hora disminuirá no a la mitad sino a la cuarta parte del avance anterior. De las características físicas de las rocas dependen, pues en forma considerable, los costos de perforación; la clasificación de las formaciones geológicas desde el punto de vista de su perforabilidad tiene, por consiguiente, una importancia decisiva.

Por lo que se refiere a los factores mecánicos, N y W, estos están determinados por las características, potencia y capacidad de la máquina perforadora; es decir, tanto N como W tienen valores máximos más allá de los cuales la perforadora no puede trabajar. A mayor potencia mayor avance, y éste mejorará en función del cuadrado del peso aplicado a la barrena. De donde se deduce la gran ventaja de utilizar máquinas de capacidad adecuada y utilizarlas con los pesos óptimos sobre barrena.

Por fin, el avance varía inversamente con el cuadrado del diámetro de perforación; de aquí la importancia de una adecuada selección de diámetros. En la industria petrolera, fracciones de pulgada en más o en menos tienen gran repercusión en los costos de los pozos. En la construcción de pozos de agua se seleccionan diámetros finales considerablemente mayores, en razón de los diámetros de las tuberías que deben alojarse para permitir el flujo de caudales muy altos. Estos diámetros de perforación se incrementan aún más cuando el diseño de los pozos exige la colocación de un filtro de grava graduada en el espacio anular entre la tubería y la pared del agujero.

En general, estas perforaciones no pueden hacerse económicamente en una sola vez, sino que primero se perfora con un diámetro relativamente reducido y posteriormente se hacen las ampliaciones necesarias para llegar a los diámetros finales de diseño. Este procedimiento introduce variaciones en la fórmula

ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS
EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.T.C. - ENERO DE 1973

ANALISIS DE COSTOS DE PERFORACION.

La de Maurer, en la cual sólo se contempla el caso de la molienda en el fondo del pozo haciendo fallar la roca por compresión y por impacto.

En el caso de la ampliación de un agujero ya existente, una buena parte de la molienda se efectúa por falla al esfuerzo cortante para el cual la resistencia de las rocas, debido a la diferencia en el esfuerzo confinante, es menor, dando como resultado que la herramienta ampliadora desprende un volumen mayor de roca, con la misma potencia, que perforando en el fondo del pozo por compresión pura. En el caso de las ampliaciones, pues, los avances reales son mayores a los deducidos por la fórmula de Maurer. Si se conoce el avance para un diámetro dado, digamos por ejemplo 12", en una determinada formación y con cierta máquina perforadora, el avance para un diámetro de 24" en las mismas condiciones no será 4 veces menor según la fórmula de Maurer, sino superior, cuando la perforación a 24" se haga en etapas.

Resumiendo: Cuando se trata de perforaciones directas en diámetros diferentes, los avances correspondientes, están en proporción inversa del cuadrado de la relación de diámetros:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$

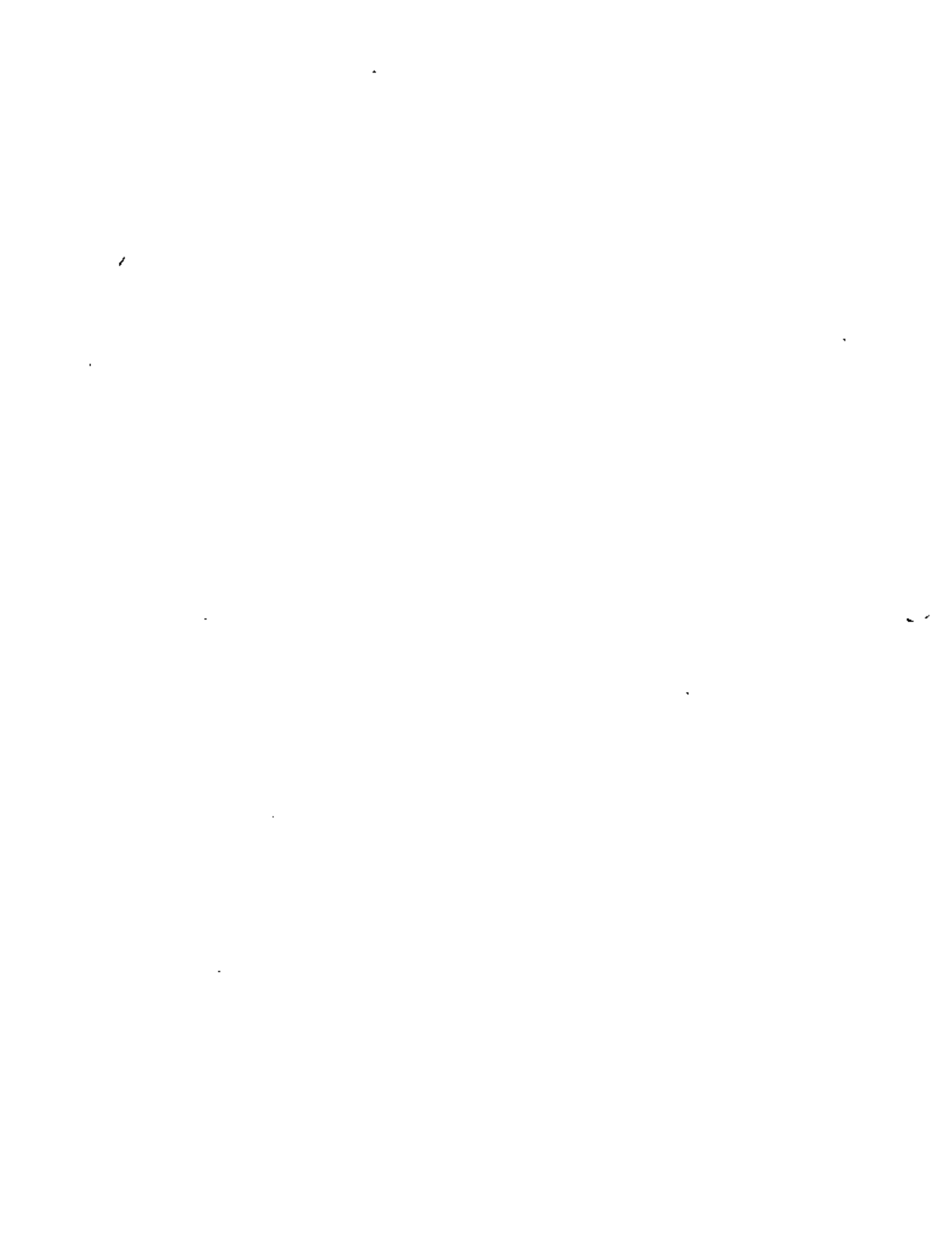
Cuando la perforación a un diámetro dado, se hizo por ampliación de un agujero de diámetro menor, los avances estarán en proporción inversa de la relación de diámetros elevada a un exponente n menor de 2

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^n \quad \text{Con } n < 2$$

RENDIMIENTOS REALES DE PERFORACION.

La discusión anterior permite apreciar los diversos factores que condicionan el avance teórico de perforación, y la proporción en que influye cada uno de ellos. Ahora bien, para efectos de cálculo de costos, es necesario referirse separadamente al concepto de rendimiento real.

El rendimiento real es el resultado de dividir una longitud perforada, entre el tiempo total empleado; tiempo que incluye tanto el de la perforación misma como los consumidos por maniobras y operaciones inherentes al proceso.



ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - AÑO DE 1973

ANÁLISIS DE COSTOS DE PERFORACION

El grupo de empresas dedicadas a esta especialidad y asociadas a la Cámara Nacional de la Industria de la Construcción ha aportado experiencias y datos que permiten establecer las cifras que se consignan adelante como expresión de rendimientos reales de perforación en los diámetros básicos y más usuales.

Hay que mencionar como uno de los problemas que han hecho más laboriosa la determinación de esas cifras, el que representa la clasificación de las rocas y formaciones geológicas en grupos más o menos homogéneos de materiales que por la dureza, estructura y granulometría presentan grados similares de dificultad a la perforación. Por razones de índole práctica y a sabiendas de que es insuficiente y de que no corresponde estrictamente a la realidad, se tomó como base la clasificación en tres grupos que figura al principio del presente análisis.

Los rendimientos que se anotan en seguida están relacionados con el empleo de equipo rotatorio tipo 2000. Para perforación a profundidades hasta de 300m, este equipo se considera adecuado a efecto de deducir cifras que lleven a costos genéricos, válidos independientemente de que se empleen otros tipos de equipo para perforar.

Los datos que llevaron a estos rendimientos fueron procesados tratando de aproximarlos a una función continua de los diámetros. Como se verá adelante, esta función es una curva exponencial correspondiente a las expresiones derivadas de la fórmula de Maurer.



ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS EN LA
ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - AGOSTO DE 1978 .

ANALISIS DE COSTOS DE PERFORACION

C U A D R O 2

RENDIMIENTOS REALES DE PERFORACION

Ø Final cm pulg	MATERIAL I Profundidad, 0 a 100 m	Rendimiento m/h
30	Perforación directa	2.96
36	Perforación directa	2.20
42	Ampliación de 30 a 46 cm (12" a 18") Rendimiento global a 46 cm (18")	2.50
	$\frac{1}{2.20} + \frac{1}{2.50} = \frac{1}{0.454+0.4}$	1.17
48	Ampliación de 30 a 61 cm (12" a 24") Rendimiento global	1.20
	$\frac{1}{2.20} + \frac{1}{1.20}$	0.77

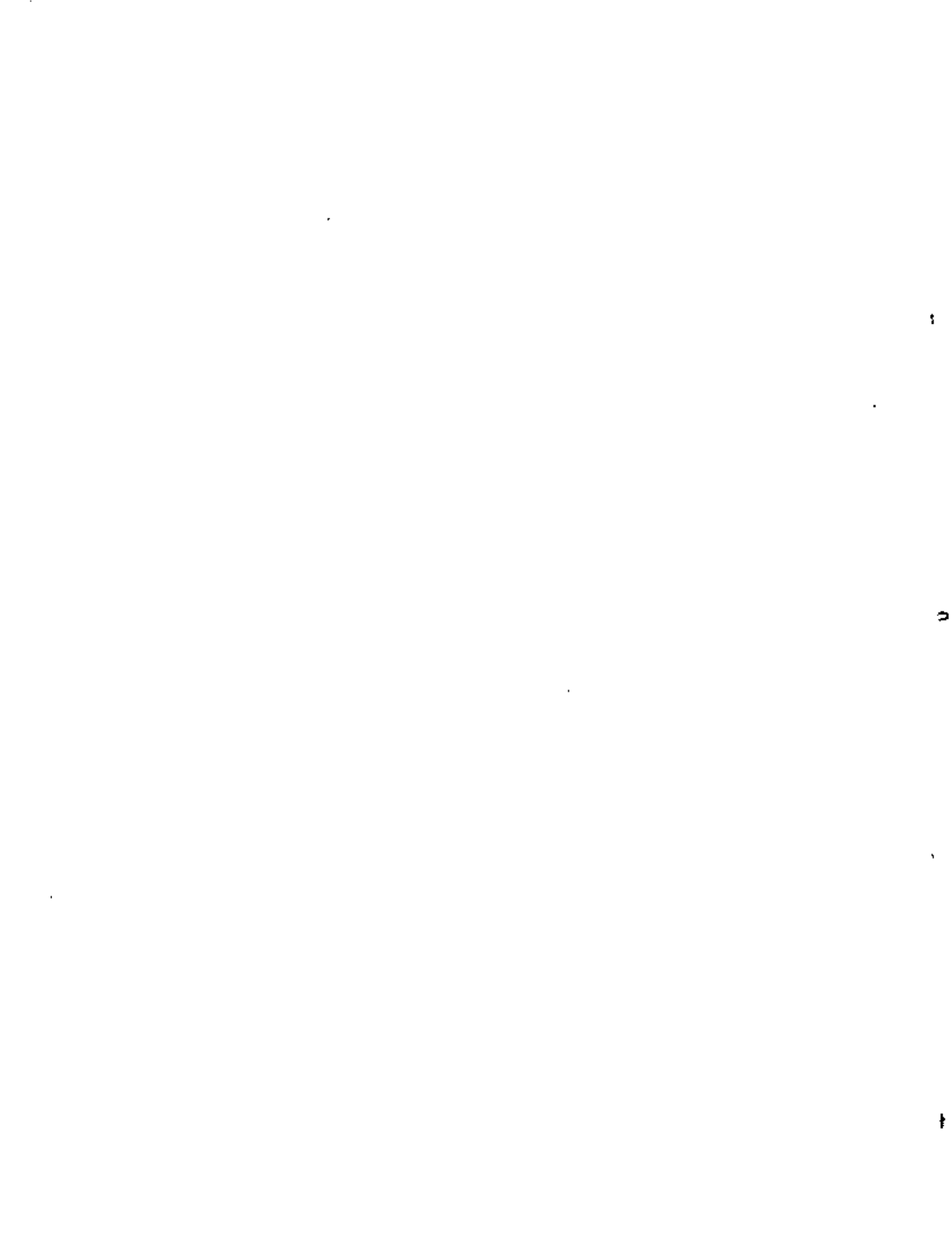


ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS EN LA
 ZONA GENERAL DE LA REPUBLICA MEXICANA
 C. R. E. M. - AGOSTO DE 1978.
 ANÁLISIS DE COSTOS DE PERFORACION

C U A D R O 2

RENDIMIENTOS REALES DE PERFORACION

Profundidad	MATERIAL II	Rendimiento
0 a 100 m	Profundidad, 0 a 100 m	m / h
8	Perforación directa	1.50
12	Perforación directa	1.10
18	Ampliación de 30 a 46 cm (12" a 18")	1.25
	Rendimiento global a 46 cm (18")	
	$\frac{1}{1.10} \cdot \frac{1}{1.25} =$	0.59
24	Ampliación de 30 a 61 cm (12" a 24")	0.65
	Rendimiento global a 61 cm (24")	
	$\frac{1}{1.10} \cdot \frac{1}{0.65} =$	0.41



ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS EN LA
ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - AGOSTO DE 1978

ANALISIS DE COSTOS DE PERFORACION

C U A D R O 2

RENDIMIENTOS REALES DE PERFORACION

Ø Final cm pulg	MATERIAL III Profundidad, 0 a 100 m	RENDIMIENTO m/h
20 8	Perforación directa	0.96
30 12	Perforación directa	0.58
46 18	Ampliación de 30 a 46 cm (12" a 18") Rendimiento global a 46 cm (18") $\frac{1}{\frac{1}{0.58} + \frac{1}{0.70}} =$	0.70 0.32
51 24	Ampliación de 30 a 45 cm (12" a 18") Ampliación de 46 a 61 cm (18" a 24") Rendimiento global a 61 cm (24") $\frac{1}{\frac{1}{0.32} + \frac{1}{0.66}} =$	0.70 0.66 0.22



ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - ENERO DE 1973

ANALISIS DE COSTOS DE PERFORACION.

C O S T O S

DIAMETROS BASICOS.

Con los rendimientos así establecidos se ha tabulado el cálculo de los costos, correspondientes en el cuadro que aparece adelante (Hoja 19).

DIAMETROS INTERMEDIOS.

El procedimiento para deducir los costos de estas perforaciones ha consistido en aplicar las relaciones, derivadas antes, de la fórmula de Maurer, según las cuales los rendimientos cuando se procede por ampliaciones sucesivas son inversamente proporcionales a la relación de diámetros elevada a un exponente n menor de 2.

Los valores de ese exponente n deducidos con las cifras consignadas como rendimientos básicos resultan ser:

C U A D R O 3

Diámetro		Mat. I	Mat. II	Mat. III
cm	pulg			
30 a 46	12 a 18	1,395	1,415	1,385
46 a 61	18 a 24	1,397	1,515	1,375

Si se acepta un valor promedio $n = 1.4$, la variación de rendimientos contra diámetros queda expresada así:

$$\frac{R_2}{R_1} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{1.4}$$

lo cual es equivalente a decir que la variación de costos contra diámetros es:

$$\frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{1.4}$$

Aunque pueden presentarse algunas variaciones, para los cálculos actualizados a 1978, se seguirá tomando $n = 1.4$.

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - ENERO DE 1973

ANALISIS DE COSTOS DE PERFORACION.

Esta relación se justifica siempre que la perforación directa y la ampliación sucesiva se hagan en el mismo material (K y S constantes en la fórmula de Maurer) y aplicando las condiciones mecánicas (N y W) óptimas en cada caso.

El cuadro de la hoja 20 presenta el cálculo de costos para diámetros de 20 a 61 cm. (8" a 24"), de 5 en 5 cm (2" en 2"), aplicando la relación anterior.

INCREMENTO DE COSTO POR PROFUNDIDAD.

Se ha convenido en considerar un valor promedio, único, para los rendimientos de perforación a profundidades hasta de 100m. Para los tramos de pozo comprendidos entre 100 y 200 m y entre 200 y 300 m se establecen coeficientes que, aplicados a los costos deducidos para el primer tramo 0 a 100 m, expresan los efectos por aumento de profundidad debidos a las siguientes causas:

- * Tiempos empleados en sacar la barrena, revisarla o cambiarla en su caso y volverla a introducir hasta el nivel de perforación; deben incluir los tiempos de acondicionamiento del pozo haciendo circular el fluido de perforación para extraer detritus tanto antes de sacar la barrena como antes de reiniciar la perforación.
- * Disminución del rendimiento, debida a incremento de la compacidad de las formaciones con la profundidad y a reducción de la eficiencia de operación de la máquina al manejar mayor peso de tubería consumiendo potencia extra.

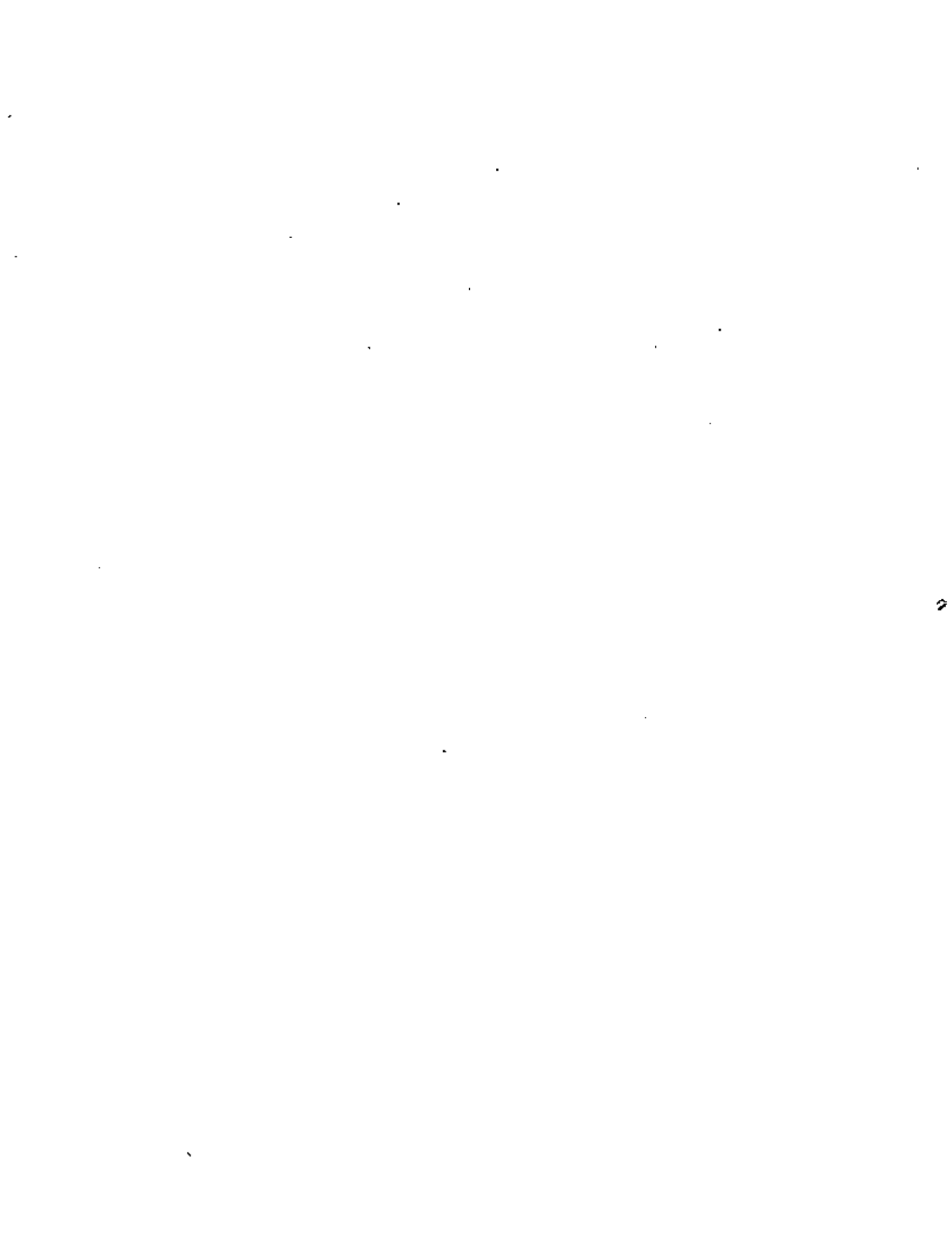
Estos factores resultan equivalentes a una reducción global del rendimiento que expresada en aumento global del costo de perforación por metro, es como sigue:

CUADRO 4

COEFICIENTES POR APLICAR A LOS COSTOS DE PERFORACION DEL TRAMO 0 A 100 M PARA TOMAR EN CUENTA LOS EFECTOS DEL AUMENTO DE PROFUNDIDAD.

CLASIFICACION	P R O F U N D I D A D E S		
	0 a 100	100 a 200	200 a 300
I	1.00	1.05	1.10
II	1.00	1.08	1.17
III	1.00	1.13	1.28

Con estos coeficientes se han calculado las cifras que aparecen en el cuadro correspondiente (Hoja 20)



ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE PIZOS EN LA ZONA CENTRAL

DE LA REPUBLICA MEXICANA. C.N.I.C. AGOSTO DE 1978.

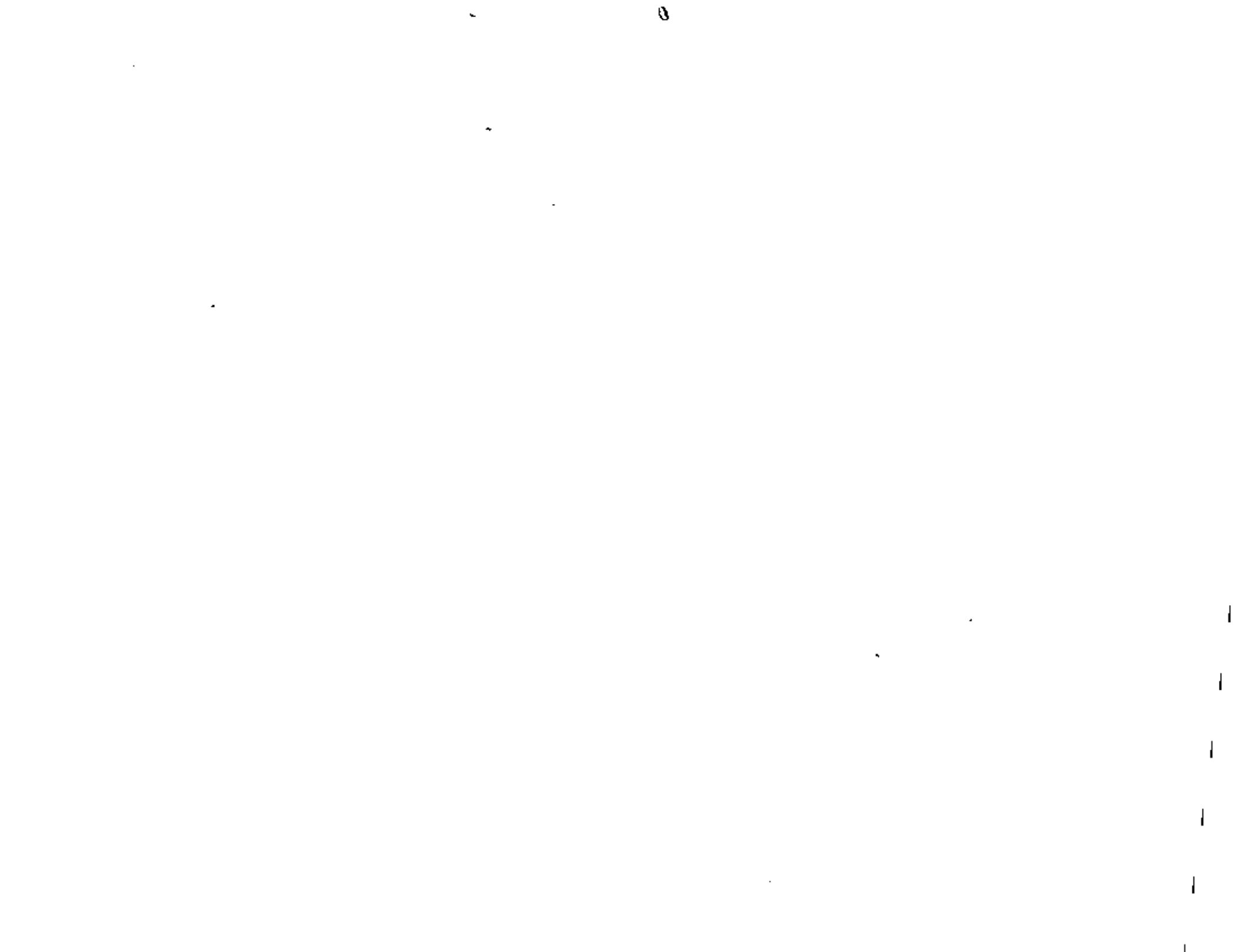
ANALISIS DE COSTOS DE PERFORACION.

CUADRO 5

COSTOS UNITARIOS DE PERFORACION

PROFUNDIDAD DE 0 A 100 METROS DIAMETROS BASICOS

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
CLASIFICACION	DIAMETRO	EQUIPO DE PERFORACION	RENDIMIENTO	CARGO	BARRERAS	RENDIMIENTO	CARGO	COSTO	AMPLIADORES	RENDIMIENTO	CARGO	COSTO TOTAL
	cm	COSTO HORARIO Ap.VI \$1,393.60 \$/h	CUADRO 2 HOJAS 14-16 m/h	(3):(4) \$/m	HORARIO Ap.VI \$/h	m/h	(6):(7) \$/m	HORARIO Ap.VI \$/h	... RENDIMIENTO	(9):(10) \$/m COSTO TOTAL (5)+(8)+(11) \$/m	
I	20	8	1,393.60	2.96	470.81	201.34	2.83	71.14	- - -	- - -	- - -	541.95
	30	12	1,393.60	2.20	633.45	245.49	1.60	153.43	- - -	- - -	- - -	766.88
	46	18	1,393.60	1.17	1,191.11	245.49	1.60	153.43	89.96	2.11	42.63	1,387.17
	61	24	1,393.60	0.77	1,809.87	245.49	1.60	153.43	86.69	0.99	87.56	2,050.86
II	20	8	1,393.60	1.50	929.06	256.25	1.32	194.12	- - -	- - -	- - -	1,123.18
	30	12	1,393.60	1.10	1,266.90	306.86	0.75	409.14	- - -	- - -	- - -	1,676.04
	46	18	1,393.60	0.59	2,362.03	306.86	0.75	409.14	133.38	0.95	140.40	2,911.57
	61	24	1,393.60	0.41	3,399.02	306.86	0.75	409.14	109.34	0.45	242.97	4,051.13
III	20	8	1,393.60	0.96	1,451.66	313.20	0.68	460.58	- - -	- - -	- - -	1,912.24
	30	12	1,393.60	0.58	2,402.75	377.68	0.39	968.41	- - -	- - -	- - -	3,371.16
	42	18	1,393.60	0.32	4,355.00	377.68	0.39	968.41	169.85	0.51	333.03	5,656.44
	61	24	1,393.60	0.22	6,334.54	377.68	0.39	968.41				
								Ampliación 30 a 46 cm (12 a 18 p.)	169.85	0.51	333.03	



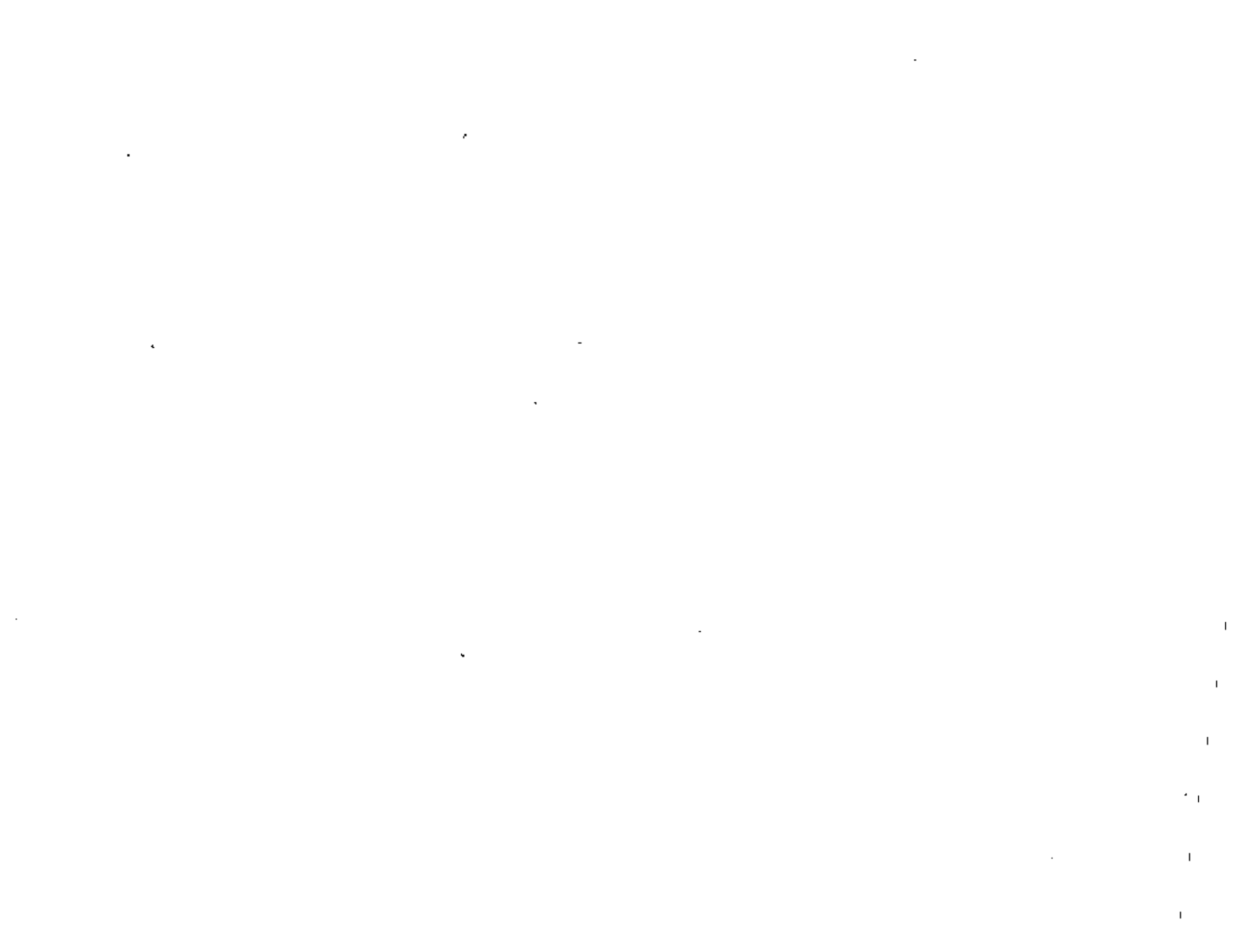
ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS EN LA ZONA CENTRAL DE LA
REPUBLICA MEXICANA. C.N.I.C. AGOSTO DE 1979. ANÁLISIS DE COSTOS DE PERFORACION

COSTOS UNITARIOS DE PERFORACION (Cifras redondeadas al \$ 1.00)

PROFUNDIDADES DE 0 A 300 M. DIAMETROS DE 20 A 61 CM (8" A 24")

CUADRO 6

(1) CLASIFICACION		(2)		(3) COSTOS DIAMETROS BASICOS	(4) $\frac{D_n}{D_b}$ (Ver Nota)	(5) $\frac{D_n}{D_b}$ 1.4	(6) C O S T O S		(7) U N I T A R I O S		(8)
MATERIAL	cm	pulg	\$/m				PROF. 0 a 100 m \$/m		PROF. 100 a 200 m \$/m Ver Nota		PROF. 200 a 300 m \$/m
I	20	8	542				542	(x1.05)	569	(x1.10)	596
	25	10		1.25	1.366		740		777		814
	30	12	786				786		825		864
	36	14		1.168	1.243		977		1025		1074
	41	16		1.332	1.494		1174		1232		1291
	46	18	1387				1387		1456		1525
	51	20		1.11	1.157		1604		1684		1764
	56	22		1.22	1.321		1832		1923		2015
	61	24	2050				2050		2152		2255
II	20	8	1123				1123	(x1.08)	1212	(x1.17)	1313
	25	10		1.25	1.366		1534		1656		1794
	30	12	1676				1676		1810		1960
	36	14		1.168	1.243		2083		2249		2437
	41	16		1.332	1.494		2504		2704		2929
	46	18	2911				2911		3143		3405
	51	20		1.11	1.157		3368		3637		3940
	56	22		1.22	1.321		3845		4152		4498
	61	24	4051				4051		4375		4739
III	20	8	1912				1912	(x1.13)	2160	(x1.18)	2256
	25	10		1.25	1.366		2611		2950		3080
	30	12	3371				3371		3809		3977
	36	14		1.168	1.243		4190		4734		4944
	41	16		1.332	1.494		5030		5690		5942
	46	18	5656				5656		6391		6674
	51	20		1.11	1.157		6543		7313		7720
	56	22		1.22	1.321		7471		8442		8815
	61	24	8005				8005		8999		9499



ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS
 EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA
 C.N.I.C. - ENERO DE 1973.
 APENDICE I - SALARIOS REALES.

DIAS NO LABORABLES EN EL AÑO

Domingos	52
Descansos por Ley	13 1/6 (1 Ene., 5 Feb., 21 Mar., 1 May., 16 Sep., 20 Nov., 1 Dic., c/6 años, 25 Dic., y -- 6 días de vacaciones).
Pérdidas por lluvia	4
	69 1/6 laborables: 295 5/6 = 295.83

DIAS PAGADOS EN EL AÑO

Salario	365
Prima 25% sobre 6 días de vacaciones	1.5
Aguinaldo	15
	<u>381.5</u>

Impuesto suplementario (antes "educación"): 1% sobre percepciones
 Fondo Nacional de la Vivienda: 5% sobre percepciones.
 Factor por aplicar al Salario Base para obtener el Salario Real: 1.06

$$\frac{\text{DIAS PAGADO}}{\text{DIAS TRABAJADOS}} \times 1.06 = \frac{381.5}{295.83} \times 1.06 = 1.37$$

El "Criterio de Interpretación de lo asentado en la Sección 4, para los efectos del punto 5.4.6 del Apartado 5 de la Sección 2, de las Bases y Normas Generales para la Contratación y Ejecución de Obras Públicas; en relación con el 5% señalado por el Artículo 136 de la Ley Federal del Trabajo" hace referencia a que algunas empresas, al participar en concursos para la ejecución de obras públicas han presentado proposiciones en las que agregan a los precios unitarios el importe del 5% aludido. Y dispone que en la integración y análisis de los citados precios unitarios no figure el 5% del importe de las percepciones de los trabajadores, que las empresas deben aportar al Fondo Nacional de la Vivienda. (Diario Oficial, 26 de octubre de 1972).

La Cámara ha expuesto ante los C.C. Secretarios de Obras Públicas y del Patrimonio Nacional y ante la Comisión Técnico Consultiva de Contratos y Obras Públicas los argumentos en que funda su criterio en el sentido de que esta aportación al Fondo Nacional de Vivienda para los Trabajadores constituye un costo directo y que, en consecuencia, debe formar parte del salario tal como lo define el Artículo 136 de la Ley Federal del Trabajo.

ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.R.I.C. - AGOSTO DE 1978.

APENDICE I - SALARIOS REALES

(CONTINUACION)

Dado que el presente estudio no tiene el carácter de proposición para concurso sino que trata exclusivamente de llegar a la determinación de costos reales en trabajos de perforación de pozos, la Cámara, sin ánimo de contradicción procede según su criterio antes mencionado e integra el 5% del Fondo Nacional de la Vivienda como una erogación efectiva que forma parte del salario real.

SALARIOS REALES	(1)	(2)
	SALARIO BASE (\$/día)	SALARIO REAL 1.37 x (1) (\$/día)
Cabo de perforación	300.00	411.00
Perforador	180.00	246.60
Ayudante perforador de 1a.(chango)	120.00	164.40
Ayudante de piso	100.00	137.00
Soldador	180.00	246.60
Mecánico de equipo de perforación	180.00	246.60
Chofer	150.00	205.50
Mecánico compresorista	150.00	205.50
Compresorista de 1a.	150.00	205.50
Compresorista de 2a.	120.00	164.40
Cabo maniobrista	150.00	205.50
Tubero de pozo	120.00	164.40
Aforador de pozo	150.00	205.50
Ayudante de aforador de pozo	120.00	164.40
Bomberero	100.00	137.00

ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS

EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - ENERO DE 1973.

APENDICE II - SALARIO POR CUADRILLAS Y SEGURO SOCIAL

	(1)	(2)	(3)	(4)
CUADRILLAS	Apéndice I	Seguro Social 0.159375(1)	Horas trabajo por año Apéndice III Col.(2)	Cargo Horario total Apéndice I 295.83((1)+(2))
	\$/dfa	\$/dfa	h/año	(3) \$/h

(A) Para operación de equipo de perforación mod. 2000

1/3 Cabo de perforación	1/3x411.00=	137.00		
1 Perforador		246.60		
1 "Chango"		164.40		
2 Ayudantes de piso	2x 137.00=	274.00		
1/3 soldador	1/3x246.60=	82.20		
SUMA:		904.20	144.10	2000
				155.05



ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.M.I.C. - AGOSTO DE 1978 - APENDICE III - CARGOS FIJOS DE EQUIPOS.

EQUIPO	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	VIDA UTIL AÑOS	UTIL h/AÑO	DEPREC. %	REPARAC. DEL VALOR MAYORES	FIJOS POR AÑO INT. ALM. IMP.	SUMA DEPRECIAR	CARGOS FIJOS POR HORA (6) : (2)
Equipo de Perforación Modelo 2000 ó similar							
a) Básico	7	2000	14	10	10.5	34.5	0.01725
b) Complementario:							
1/3 Soldador eléctrico 300 A	5	2000	20	15	12	47	0.0235
Equipo soldadura autógena	4	2000	25	20	12	57	0.0285
Planta luz 5 MW Diesel	10	2000	10	10	12	32	0.0160

ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.A.S.C. - AGOSTO DE 1976 - APENDICE IV - CONSUMOS DE EQUIPOS

EQUIPO	(1)	(2)	(3)		(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
	POTENCIA NOMINAL	POTENCIA OPERACION	COMBUSTIBLES		DIESEL	GASOLINA	ACEITES	TOTAL	CONSUMO	CARTER	TOTAL	
	HP.	HP.	0.1514(2)	\$0.70(3)	0.227(2)	\$3.00(5)	(4)+(6)	0.0531(2)	Cap./100h	(8)+(9)	15.00(10)	15.00(10)
			l/h	\$/h	l/h	\$/h	\$/h	l/h	l/h	l/h	l/h	\$/h
Equipo de perforación modelo 2001 ó similar												
a) Básico												
a.1.) Malacate y ródula	130	91	13.78	9.64	--	--	9.64	0.28	0.40	0.68	10.20	
a.2.) Bomba de lodos	130	117	17.71	12.39	--	--	12.39	0.36	0.53	0.89	13.55	
b) Complementario												
1/3 Soldadura eléctrica 300 A	60	18	--	--	4.09	12.27	12.27	0.06	0.06	0.12	1.80	
Planta de luz 5 KW Diesel	12	6	0.91	0.63	--	--	0.63	0.02	0.04	0.06	0.90	



ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.H.I.C. - AGOSTO DE 1978 - APENDICE IV - CONSUMOS DE EQUIPOS. (CONTINUACION)

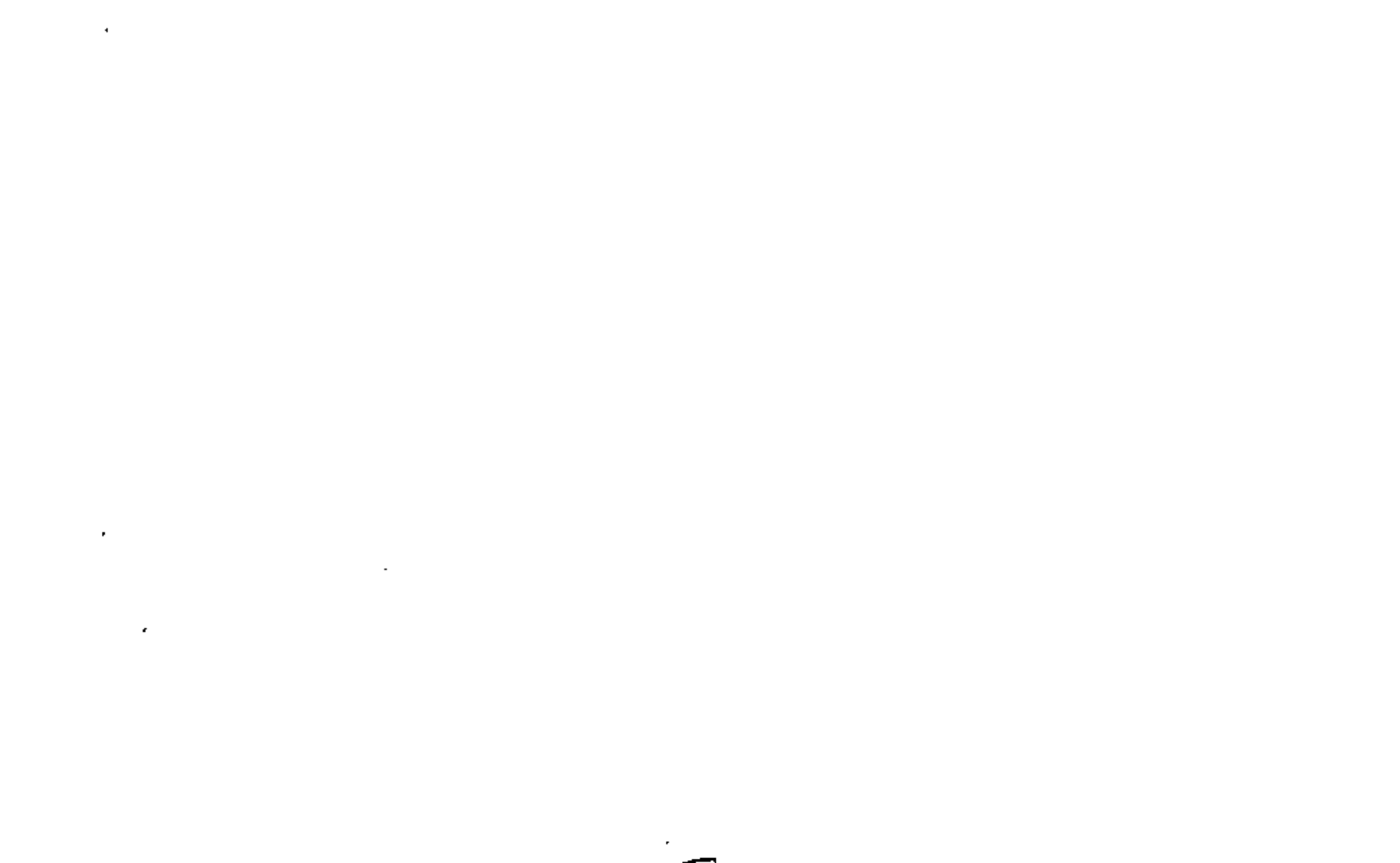
EQUIPO	(12) VARIOS (Estopa, grasas, etc.) \$/h	(13) MEDIDAS	(14) L L A N T A S NUMERO pzas.	(15) IMPORTE TOTAL \$	(16) VIDA UTIL h	(17) CARGO HORARIO (15):(16) \$/h	(18) TOTAL CONSUMOS (7)+(11)+(12)+(17) \$/h
Equipo de perforación MOD. 2000 S similar							
a) Básico							
a.1) Malacate y rotaria	6.00	10 x 20	10	60,000.00	3000	20.00	45.84
a.2) Bomba de lodos	-		-		-	-	25.74
b) Complementario							71.58
1/3 Soldadura eléctrica 300 A	-		-		-	-	14.07
Planta de Luz 5 KW Diesel	-		-		-	-	1.53



ANÁLISIS DE LOS DEFECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

CANTIDAD - AÑO 1975 - APENDICE V - COSTOS PROPIOS DE EQUIPOS

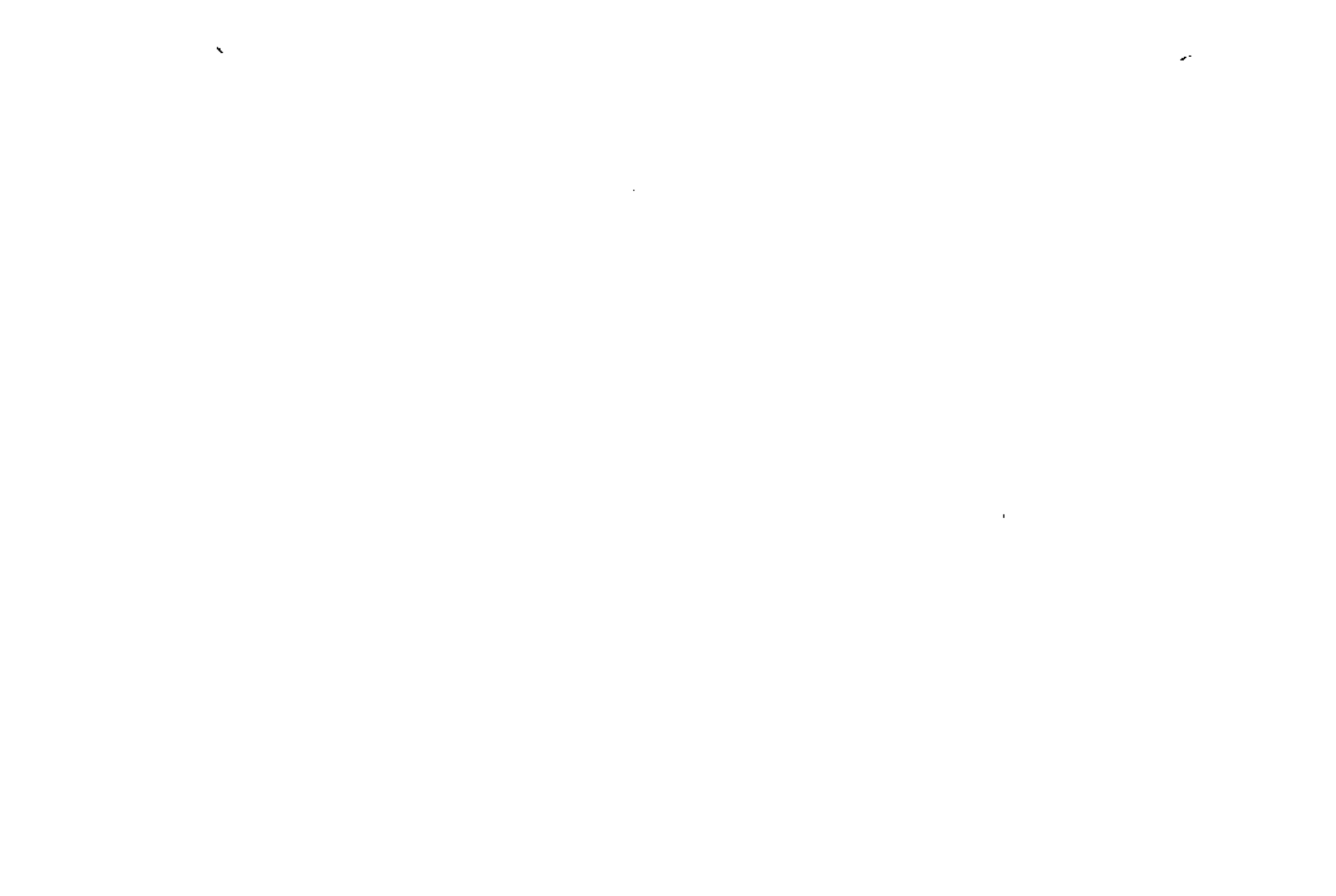
EQUIPO	(1) CANTIDAD	(2) COSTO UNITARIO	(3) VALOR POR DEPRECIAR $0.9[(2)-(1)]$	(4) AP. III Col. (7)	(5) (4)(3)	(6) CONSUMOS AP. IV Col. (10)	(7) MANO DE OBRA AP. II	(8) COSTO MATERIAL QUINARIA TRABAJANDO (5)+(6)+(7)	(9) REPARACIONES MAYORES AP. I:1 Col. (4)(9)x(3) Col. (2)Ap. III	(10) REPARACIONES MAYORES AP. I:1 Col. (2)Ap. III	(11) COSTO QUINARIA PARA (8)-(9)
	\$	\$	\$	\$	\$/h	\$/h	\$/h	\$/h	%	\$/h	\$/h
Equipo de perforación manual 2000 ó similar Tipo construcción	200,000.00	60,000.00	6,246,000.00	0.01725	1077.43	71.58	155.05	1304.06	10	312.30	
a) Básico											
b) Complementario											
1/3 Soldadora eléctrica tipo	205,000.00	- - - -	195,400.00	0.0235	43.57	14.07	Incl.	57.64	15	13.90	
Equipo de soldadura eléctrica	12,000.00	- - - -	12,000.00	0.0285	3.42	- - -	em. eq.	3.42	20	1.20	
Planta de luz 5 hp tipo	50,000.00	- - - -	45,000.00	0.0160	7.20	1.53	básico	8.73	10	2.25	
						<u>87.18</u>		<u>1373.85</u>		<u>329.65</u>	957.0



ANALISIS DE COSTOS DIRECTOS DE CONSTRUCCION DE POZOS EN LA ZONA CENTRAL DE LA REPUBLICA MEXICANA

C.N.I.C. - AGOSTO DE 1978 - APENDICE VI - COSTOS HORARIOS DE HERRAMIENTAS DE ATAQUE

HERRAMIENTA	COTIZACION	MATERIAL I		MATERIAL II		MATERIAL III	
		Vida Util	Cargo	Vida Util	Cargo	Vida Util	Cargo
	\$	h	\$/h	h	\$/h	h	\$/h
Barrena Ø 20.32 cm (8")	14,094.00	70	201.34	55	256.25	45	313.20
Barrena Ø 24.13 (9 1/2")	17,181.80	80	214.77	65	264.33	55	312.39
Barrena Ø 30.48 cm (12")	24,549.20	100	245.49	80	306.86	65	377.68
Ampliador Ø 45.72 cm (18")							
Cuerpo	37,425.00	4,000	9.35	3,000	12.47	2,000	18.71
Cortadores	24,183.00	300	80.61	200	120.91	160	151.14
			<u>89.96</u>		<u>133.38</u>		<u>169.85</u>
Ampliador Ø 60.96 (24")							
Cuerpo	46,700.00	4,000	11.67	3,000	15.56	2,000	23.35
Cortadores	37,513.00	500	75.02	400	93.78	250	150.05
			<u>86.69</u>		<u>109.34</u>		<u>173.40</u>
				- TODOS MATERIALES			
			Vida Util		Cargo		
	\$		h		\$/h		
Combinaciones (1 Juego 8)	24,000.00		2,000		12.00		
Cable (150 Ø 19 mm)			1,000		6.00		
Grasas					1.75		
					<u>19.75</u>		



: PERFORADORA ROTATORIA PARA PERFORAR A 300 M.
 DE PROFUNDIDAD CON 60,000 LIBRAS DE LEVANTE,
 PORTATIL, MONTADA SOBRE CAMION.

Marzo de 1978

PERFORADORA PORTADRILL	U.S.	M.N.
TKT CONTRACTOR MONTADA SOBRE CAMION CON BOMBA DE Lodos	270,493.00	
BARRAS DE PERFORACION , 300 M	27,293.50	
LASTRABARRENAS, 18 M x 7 1/4"	8,452.00	
SUBSTITUTOS, 6	3,096.90	
	<u>309,245.40 US.</u>	<u>7'060,072.43 MN.</u>
LLANTAS, 10		60,000.00
		<u>7'000,072.43 MN.</u>



PRECIOS - BARRENAS
" P U B L I C O "

En vigor a partir del 1º de Agosto de 1978

TIPO JET

MEDIDA:

5 5/8"	\$ 10,545.00
6"	11,355.00
6 1/2"	12,320.00
8 1/2"	15,404.00
9 1/2"	18,451.00
12 1/4"	26,231.00
14 3/4"	41,845.00

CONDICIONES DE VENTA ACTUALES:

Menos 2% descuento por pago a 15 días, fecha de factura
Neto a 30 días,
Más el 4% de I.S.I.M.

Financiamiento: 1.5% mensual después del 31vo. día;
Máximo: 90 días

Precios sujetos a cambio sin previo aviso

Vigencia de cotizaciones: 30 días

L. A. B. Nuestra Planta





de México, S. A.

OFICINAS:
AV. FERROCARRIL 98, MEXICO 9, D.F.
TELE 542-4110. CON 10 LINEAS

CABLE: TEFEMEX 017-73-155
CED. DE EMP. 26153D
REG. FED. DE CAUSANTES TME-690528-002
REG. CAMARA NAL. IND. HIERRO Y ACERO No. 156
REG. SECRETARIA DEL PATRIMONIO NACIONAL No. 29633
CLAVE PROVEEDOR 101-T-163

PLANTA: VERACRUZ
APARTADO POSTAL:
TELS.: { 3-17-0
 3-12-0
 3-15-11

FACTURA B 11565

POR LOS MATERIALES EMBARCADOS NOY POR MEDIO

LA OLMECA, S.A.
CULIANGAN no 123-1500
MEXICO 13 D.F.

RECEBIÓ EN:
LA OLMECA, S.A.
INVENTARIO DE INGRESOS No. 22
COYOACAN, MEXICO, D.F.

NO MEDIDO

NUESTRA REFERENCIA

FECHA

972

11-57

PARTIDA	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
7	Barreras triangulares de 1 1/4" tipo D10-D Nos. de serie 9072 9073 y 9074 69 74 69	5	223,605.00	1,118,025.00
			TOTAL :	1,118,025.00
	<i>obra 64. - 49,098.66</i>			
	<i>obra 74. - 24,549.34</i>			

RECIBIÓ EN LA OLMECA, S.A. EN EL MUNICIPIO DE COYOACAN Y COMO LEGITIMO REPRESENTANTE



TF DE MEXICO, S. A.

OFICINAS:
 AV. FERROCARRIL 98 PISO MEXICO 4, D.F.
 TEL. 525-45-80 CON 10 LINEAS
 TELEF. 017-73-155

CABLE: TEFEMEX 017-73-155
 C.E.O. DE EMP. 261530
 REG. FED. DE CAUSANTES TMC-490528-002
 REG. CAMARA NAL. IND. HIERRO Y ACERO NO. 156
 REG. SECRETARIA DEL PATRIMONIO NACIONAL NO. 23622
 CLAVE PROVEEDOR 101-T-169

PLANTAS:
 MEXICO 7, D.F.
 AV. FERROCARRIL 98 COL. MOCHEZUMA ZA SEC.
 VERACRUZ, VER.
 APARTADO POSTAL 574 TEL. 3-11-00

LA OLMECA, S.A.
 CUIACAN N° 123-1006
 MEXICO 11, D.F.

PARCIAL

COPIA 10/25
FACTURA

POR LOS MATERIALES EMBARCADOS HDY POR MEDIO DE:

TRANSPORTE T.A.M. S.A. TALON
 11272.

REEXPEDIR A:
 LA OLMECA, S. A.
 BELISARIO DOMINGUEZ No. 113
 COTOACAN, MEXICO, D.F.

SU PEDIDO NUESTRA REFERENCIA FECHA

972 OF-5952 REG.-8114-XI-7

FEB-28-78

PAR- TIDA	D E S C R I P C I O N	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
1	BARRENAS TRICONICAS DE PERFORACION DE 8 1/2" D.E. TIPO OSC-IGJ. N°S. SERIE: 8637 AL 8643.	7	\$13,552.00	94,864.00
			4% IMP.S/ING.MERC.	3,795.00
			TOTAL:	\$ 98,659.00
				=====

(NOVENA Y OCHO MIL SEISCIENTOS CINCUENTA Y NUEVE PESOS 00/100 M.N.)

TF DE MEXICO, S. A.

OFICINAS:
AV. TERRACERIL 98, MEXICO D. F.
TEL.: 542-41-10, CON 10 LINEAS

CABLE: TELEMEX 017-73-55
CED. DE EMP. 261538
REG. FED. DE CAUSANTES IME-670528-002
REG. CAMARA NAL. IND. MIERRO Y ACERO NO. 158
REG. SECRETARIA DEL PATRIMONIO NACIONAL NO. 27633
CLAVE PROVEEDOR 101-T-MV

PLANTA: VERACRUZ, V.L.
APARTADO POSTAL 57
3-11-00
3-12-09
3-15-10

LA OLMECA, S.A.
CULIACAN No. 123-1035
MEXICO 11, D.F.

FACTURA B N° 11729

POR LOS MATERIALES EMBALAJES NOY POR MEDIO DE
TRANSP. F. C. VALENCIA
Telón No.: 2984
REEXPEDIR A: *
LA OLMECA, S.A.
BELISARIO DOMINGUEZ No. 113
COYOACAN, MEXICO, D.F.

CONTINENTE

NUESTRA REFERENCIA

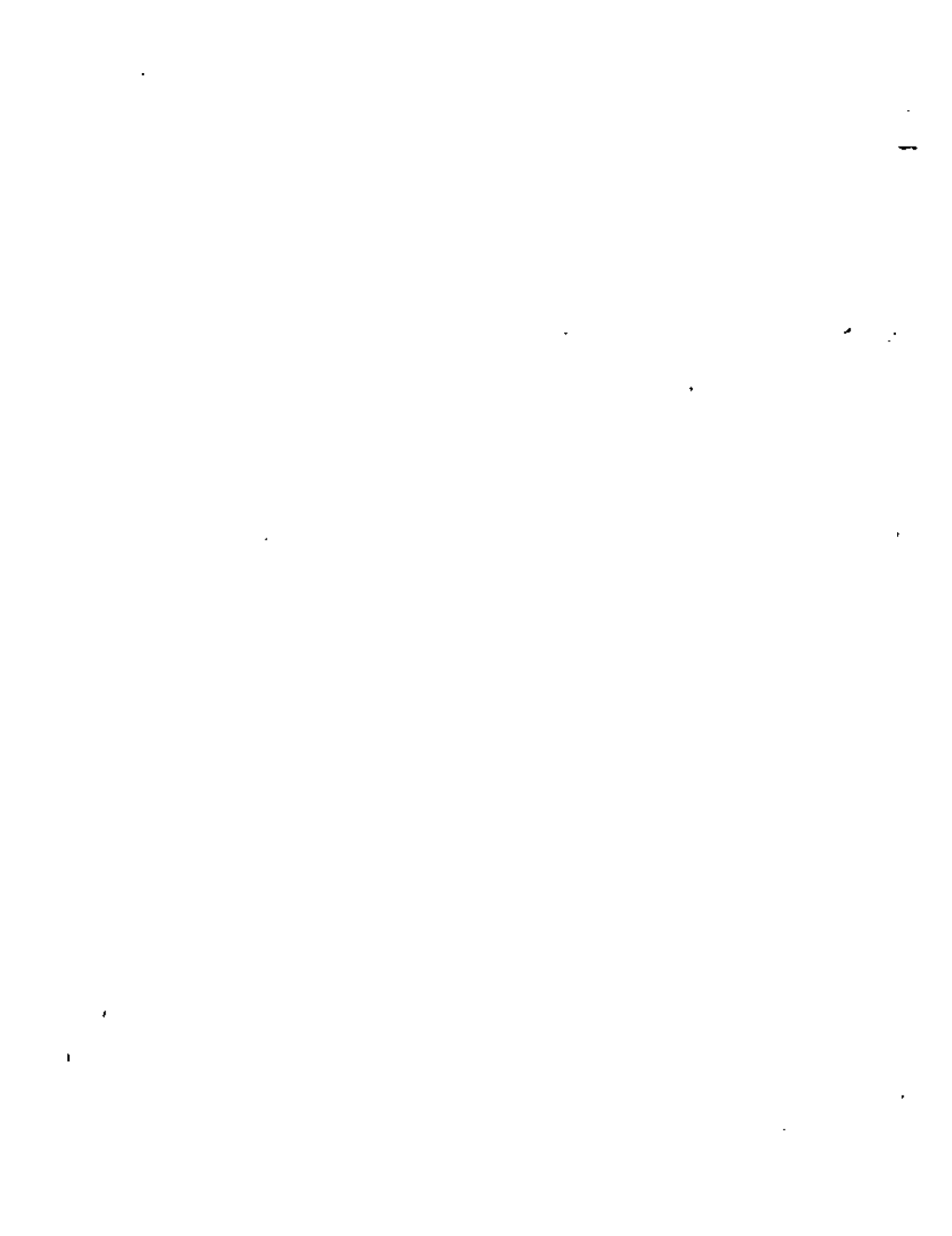
FECHA

372 CF. 5955 REG. 8114 -XI-7 Julio 15^o 1976

CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
5	Estornos triónicos de perforación de 9 1/2" tipo USAF serie Nos.: 6324, 6331, 6347, 6352 y 6315. 64 74 74 CC Al... 4%	\$16,521.00	\$ 82,605.00
		IMP. S/EG. MERC:	3,304.00
		TOTAL:	\$ 85,909.00

(OCHENTA Y CINCO MIL NOVECIENTOS NUEVE PESOS 00/100 U.S.)

Ans. 74 --- 51, 545.00
Ans. 66 --- 34, 3.3.00





SULLAIR DE LATINOAMERICA CORP.

300 SOUTH DADELAND BOULEVARD • SUITE 103 • MIAMI, FLORIDA 33156

305/665-3603
TELEX: 515630
CABLE: SULLAMERICA

Página 6

BROCAS Y RIMAS

Precio Unitario
U.S. Dollars

A. Brocas para martillo A53-15 con insertos de carburo de Tungsteno

Medida

6 1/8"	\$ 644.00
6 1/2"	693.00
7"	804.00
8"	912.00

B. Brocas Tricónicas para formaciones suaves y medias tipo de dientes

Medida

REG API

7 7/8"	4 1/2"	454.00
9"	4 1/2"	500.00
11"	6 5/8"	696.00
12 1/4"	6 5/8"	847.00

C. Brocas Tricónicas para formaciones medias y duras tipo insertos de carburo de Tungsteno

Medida

REG API

7 7/8"	4 1/2"	1,636.00
9"	4 1/2"	1,843.00
11"	6 5/8"	2,387.00
12 1/4"	6 5/8"	3,120.00

D. Rimas para ampliar, tipo de dientes, para materiales suaves y duros.

Medida

Perforación
Piloto Mínima

REG API/Box
Medida

U.S. 22 75 x 1.30

15" - 17"	9" 11"	6 5/8" API/6 5/8" Box	2,074.00	\$6.10
19 1/4" - 20"	13 3/4"	6 5/8" API/6 5/8" Box	2,730.00	
20 1/4" - 23 1/2"	15"	6 5/8" API/6 5/8" Box	2,835.00	24,713.60

SULLAIR DE LATINOAMERICA CORP.

00 SOUTH DADELAND BOULEVARD • SUITE 103 • MIAMI, FLORIDA 33156

305/665 3503
TELEX: 515630
CABLE: SULAMERICA

Agosto 19, 1977

LA OLMECA S.A.
Ing. Pedro de Lara
Culiacán 123-1006
México 11, D.F.

REF: 23-6034/MEX

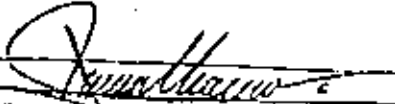
Estimado Ing. de Lara:

Por medio de la presente nos es grato someter a su consideración nuestra cotización por una máquina perforadora para pozos de agua, marca Driltech, modelo D40K, además de la máquina básica le estamos anexando el equipo necesario para perforar tanto con el sistema rotario como con el sistema martillo en fondo, también todos los accesorios necesarios para la operación.

Agradeciéndole de antemano la atención prestada por ustedes y en espera de sus noticias, nos despedimos.

Atentamente,

SULLAIR DE LATINOAMERICA CORP.


Ing. Ricardo Moreno
Gerente de Area

RM/mf
(adj.)



SULLAIR DE LATINOAMERICA CORP.

9300 SOUTH DADELAND BOULEVARD • SUITE 103 • MIAMI, FLORIDA 3

305/665
TELEX: 5
CABLE: SULAME

1. INFORMACION GENERAL

1.1 - GENERALIDADES: La perforadora Driltech, modelo D40K, está diseñada para poder utilizarse en condiciones y lugares de difícil acceso. La unidad está montada sobre un camión específicamente diseñado para el propósito de la máquina.

1.2 - MASTIL: Construcción es totalmente de acero por medio de unidades tubulares, rectangulares y ángulos soldados eléctricamente. El pivote del mástil es un muñón colocado a 4'6" sobre la plataforma de la máquina. La torre se eleva por medio de cilindros hidráulicos de alta presión equipados internamente con válvulas, check de seguridad para evitar que el mástil se caiga en caso de la rotura de una manguera hidráulica durante la transición de la horizontal a la vertical y además posee seguros mecánicos para mantener el mástil en una posición vertical con plena seguridad. Todos los controles para el movimiento del mástil están localizados en el tablero central.

1.3 - SISTEMA DE ROTACION: El sistema de rotación es completamente hidráulico y posee control completo de rotación infinita de 0 a 200 RPM con pares de torsión máximos de tal manera que el operador puede seleccionar la velocidad óptima de la broca para el tipo de formación geológica que esté perforando. La cabeza de rotación es accionada por un motor hidráulico axial tipo pistón, cuya transferencia de potencia se realiza a través de engranajes tipo pesado. Los rodamientos son Timken tipo cónico para recibir adecuadamente las cargas axiales, así alargando la vida del equipo. Los rodamientos del mandril principal son sellados por ambos lados. El diseño de la toma de aire en la parte superior del mandril es de tipo gancho giratorio.

RANGO DE ROTACION

Standard 0-100 RPM con un par de torsión de 53000 in-lbs.
Opcional 0-130 RPM con un par de torsión de 40600 in-lbs.
Opcional 0-150 RPM con un par de torsión de 35500 in-lbs.
Opcional 0-200 RPM con un par de torsión de 27000 in-lbs.

1.4 - ALIMENTACION: La alimentación vertical se efectúa por medio de dos cadenas tipo rodillo, alta dureza, para uso pesado, que están conectadas a ambos lados del cabezal de rotación, el cual a su vez está sujeto a dos guías deslizables. Las cadenas están accionadas por dos cilindros hidráulicos con una relación reductora de 2:1. La velocidad de alimentación es de 0 a 100 pies por minuto. El sistema puede aplicar una presión sobre la broca hasta 40,000 lbs.



SULLAIR DE LATINOAMERICA CORP.

100 SOUTH DADELAND BOULEVARD • SUITE 103 • MIAMI, FLORIDA 33156

305/685-13
TELEX: 51563D
CABLE: SULAMERICA

Página 2

- 1.5 - SISTEMA CAMBIA-BARRAS: El sistema para agregar y quitar barras es compuesto por dos colocadores accionados hidráulicamente, uno localizado dentro del mástil (opcional) y el otro localizado externamente dando así al operador una capacidad de 12 barras, o sea, 300' de perforación sin necesidad de equipo de transporte adicional. Se provee además un sistema hidráulico para el desacoplamiento de las barras, el cual es controlado directamente desde el panel de controles de la máquina.
- 1.6 - POTENCIA MOTRIZ: La potencia motriz consiste de un motor Diesel Caterpillar, modelo 3406, otorgando 310 HP a 2000 RPM.
- 1.7 - SISTEMA HIDRAULICO: El sistema hidráulico consiste de 3 bombas a través de un engranaje reductor directamente acoplado al eje de la toma fuerza del motor. Las bombas hidráulicas son una axial tipo pistón de volumen variable, otra axial tipo pistón volumen constante y la otra es una bomba doble tipo rotativo que proveen la potencia hidráulica necesaria para operar la perforadora. La capacidad combinada de los tanques en la succión y retorno proveen una reserva de 185 galones. Los tanques están equipados con un respirador presurizado, filtros de alivio de alta presión para protección de las bombas. El diseño del sistema de dos tanques con su gran capacidad ofrece un amplio enfriamiento del aceite hidráulico para todas las condiciones de operación sin necesidad de un sistema adicional para enfriamiento del aceite.
- 1.8 - CONTROLES: Los controles están agrupados convenientemente en una caja de acero protegida contra el medio ambiente, con tapas laterales bisagradas para el acceso fácil de todas las conexiones hidráulicas del tablero. El grupo de controles está localizado de tal manera que el cabezal de rotación, la barra y la mesa de la máquina son completamente visibles desde el puesto de operación. El operador y los controles están protegidos contra el medio ambiente por medio de una plancha de acero que se extiende sobre el puesto de operación.



SULLAIR DE LATINOAMERICA CORP.

300 SOUTH DADELAND BOULEVARD • SUITE 103 • MIAMI, FLORIDA 331

305/665-3603
TELEX: 515630
CABLE: SULAMERICA

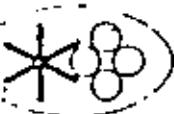
Página 3

2. ESPECIFICACIONES

- 2.1 - PESO SOBRE LA BROCA: Variable hasta 40,000 lbs.
- 2.2 - ROTACION: 0 a 200 RPM.
- 2.3 - PAR DE TORSION: Variable hasta 53,000 in-lbs.
- 2.4 - GATOS PARA NIVELACION: Cantidad (3) con carrera de 48", tipo hidráulico, con válvulas check de seguridad; colocados dos atrás y uno en la parte delantera.
- 2.5 - MONTAJE: La máquina perforadora viene montada sobre un camión especialmente diseñado por la Crane-Carrier, modelo DR-1564, con una capacidad en los ejes: delantero - 18,000 lbs.
trasero - 44,000 lbs.
- 2.6 - PROPULSION: Motor Diesel Caterpillar modelo 3208 desarrollado 210 HP a 2,800 RPM.
- 2.7 - COMPRESOR: Sullair de 750 CFM a 250 PSI tipo tornillo, dos etapas, inundado en aceite tipo uso pesado para trabajar 24 horas continuas. 2 años de garantía.
- 2.8 - DIMENSIONES: Con el mástil en posición horizontal:
Largo: 33'7"
Ancho: 9'0"
Alto: 12'7"
Con el mástil en posición vertical:
Largo: 20'10"
Ancho: 8'0"
Alto: 35' - 4 1/2"
- 2.9 - VELOCIDAD DE TRANSPORTE: Máxima: 48.0 millas por hora.
Pendiente Máxima: 36.85% a 2.67 mph.
- 2.10 - SISTEMA HIDRAULICO: Bombas: 3
Tanque: Capacidad 185 galones
- 2.11 - MALACATE AUXILIAR: Tipo Hidráulico: Capacidad 6000 lbs., incluye 100 pies de cable.

1...





SULLAIR DE LATINOAMERICA CORP.

100 SOUTH DADELAND BOULEVARD • SUITE 103 • MIAMI, FLORIDA 33156

305/665-3603
TELEX: 515630
CABLE: SULAMERICA

Página 4

3. PRECIOS

Precios Unitarios
U.S. Dollars

PERFORADORA DRILTECH MONTADA EN CAMION PARA PERFORAR POZOS DE AGUA, MODELO D40K, CON EL SIGUIENTE-EQUIPO-ESTANDARD: \$ 207,449.00

- Camión marca Crane Carrier, modelo
- Motor Diesel Caterpillar, modelo 3208
- Motor Diesel Caterpillar, modelo 3406
- Sistema hidráulico con 3 bombas
- Compresor Sullair de 750 PCM a 250 lbs./plgd.²
- Cargador Externo
- Mesa retroactiva

A. Accesorios Generales

- 1 - Lubricador de Línea \$ 919.00
- 1 - Silenciador motor Caterpillar 3406 \$ 551.00
- 1 - Sistema de Luces \$ 730.00
- 1 - Cargador Interno \$ 5,539.00
- 1 - Tanque Adicional de Diesel (70 galones) \$ 305.00
- 1 - Sistema de inyección de agua (sin tanque) \$ 1,391.00
- 1 - Kit lavador - tiene que contar con el sistema de inyección \$ 105.00
- 1 - Tanque de 100 galones para agua \$ 567.00

B. Accesorios Para Perforación Con Rotación

- 1 - Sistema de Bombas (dos 6" X 5") \$ 11,708.00
- 1 - Kit de Perforación para Barras de 4 1/2" & 5" O.D. \$ 1,155.00

Substituto Superior
Substituto para Brocas
Buje de Mesa
Ana de Levante

230,419.00

- 1 - Tubería de perforación de 4 1/2" O.D., rosca API \$ 775.00
- tramos de 25 pies, para servicio pesado *40 tramos (2000)* \$ 29,000.00
- 1 - Tubería de perforación de 5" O.D., rosca API tramos \$ 893.00
- de 25 pies, para servicio pesado *4 x \$90.00* \$ 3,572.00
- 1 - Lavador para brocas de 6 1/4" - 6 3/4" para ser \$ 221.00
- usado en barras de 4 1/2" & 5" *262,911.00*
- 1 - Bata para brocas de 7 3/8" & 7 1/8" para ser \$ 252.00
- usado en barras de 5"

1...





SULLAIR DE LATINOAMERICA CORP.

SOUTH DADELAND BOULEVARD • SUITE 103 • MIAMI, FLORIDA 3315

305/665-3603
TELEX: 515630
CABLE: SULAMERICA

Página 5

Precios Unitarios
U.S. Dollars

- 1 - Substituto para Brocas 3 1/2" API X 4 1/2" API/BOX \$ 550.00
- 1 - Substituto para Brocas 3 1/2" API X 6 5/8" API/BOX \$ 660.00

C. Accesorios para Perforación Con Percusión (Martillo)

- 1 - Martillo neumático marca "Mission" modelo Megadrill A53-15 para perforar de 6" a 8 1/2" \$ 5,040.00
- 1 - Llave tipo Petrol con cadena para martillo \$ 824.00
- 1 - Llave para barras tipo "J" \$ 168.00
- 1 - Colector de Polvos Rotoclon \$ 6,248.00
- 1 - Kit de perforación para el sistema de percusión en barras de 4 1/2" y 5" incluye:
 - Substituto Superior
 - Buje de Mesa (Dividido)
 - Buje de Mesa
 - Substituto de Martillo
 - Asa de Levante
- 1 - Tubería de perforación de 4 1/2" de O.D. rosca API tramos de 20 pies para el arranque con martillo \$ 677.00
- 1 - Tubería de perforación de 5" de O.D. rosca API tramos de 20 pies para el arranque con martillo. \$ 814.00

TIEMPO DE ENTREGA: 12 a 16 semanas

LUGAR: LAB. FABRICA

CONDICIONES DE PAGO: A convenir

PRECIOS SUJETOS A CAMBIO SIN PREVIO AVISO

11

Q



tractores y maquinaria del centro, s. a.

CALZ. GONZALEZ GALLO No. 1335
GUADALAJARA, JALISCO.

TEL. 35-92-57
MEXICO

TRACBA

EXP: 432
OPS: 80226490

Abril 6, 1978.

LA OLMECA, S. A.
Culiacan No. 123, 1006
México 11, D. F.

AT'N. ING. ALFREDO BERLANGA

Muy Señores Nuestros:

Por medio de la presente nos es grato presentar a su atenta consideración nuestra siguiente cotización de Perforadora - de Pozos profundos marca Speedstar Modelo SS-25 II montada sobre camión con las siguientes capacidades:

Con tubería de 2 3/8" - 1,368 mts., con tubería de 2 7/8" - 1,067 mts., con tubería de 3 1/2" - 762 mts., con tubería de 4 1/2" - 610 mts.

Motor marca General Motors Modelo 4-71, Diesel, 117 HP, a 1800 RPM, Equipado con filtros para combustible, filtro de aceite, filtro para aire, sistema eléctrico de 12 volts, silenciador, compresor de aire, radiador de gran capacidad para enfriamiento, regulador de velocidad variable, horometro y sistema automático de parada por baja presión de aceite o alta temperatura de agua.

Transmisión automática, convertidor de par, para servicio pesado, con (5) velocidades, acoplado directamente al motor.

Caja de transferencia, sistema de engranajes para transmisión de potencia a la cadena que impulsa el malacate. Construcción en baño de aceite con engranajes tratados térmicamente y montados sobre rodamientos de bolas y de rodillos. El accionamiento de la mesa rotatoria se realiza por medio de flecha montada sobre la caja.

Malacate de TRIPLE TAMBOR, tipo servicio pesado cada tambor equipado con (2) frenos de (2) ban-

SIN COMPRESOR



das y embragues de 18" y 2 discos. El tambor de cuchareo (Sand Line) esta equipado con freno de una banda y embrague neumático de 14" y un disco. Los ejes de los tambores estan montados sobre rodamientos anti-fricción. Los dos tambores principales estan equipados con repartidores de cable Lebus.

Tambor para barra Kelly y tambor de levante.

Diámetro 15" P.D.

Largo 15 1/4"

Tirón -Tambor vacío 18,000 lbs.

Frenos 8" ancho x 26" diámetro.

Area neta de contacto - 11,500" cuad.

Embrague 2 Discos, 18" neumático.

Capacidad de cable - 795 ft. línea de 3/4"

Tambor de cuchareo:

Diámetro 7 1/2"

Largo 23 1/2"

Tirón-Tambor vacío - 7,000 lbs.

Freno 6" ancho x 22" diámetro

Area contacto 360 Pulgadas cuad.

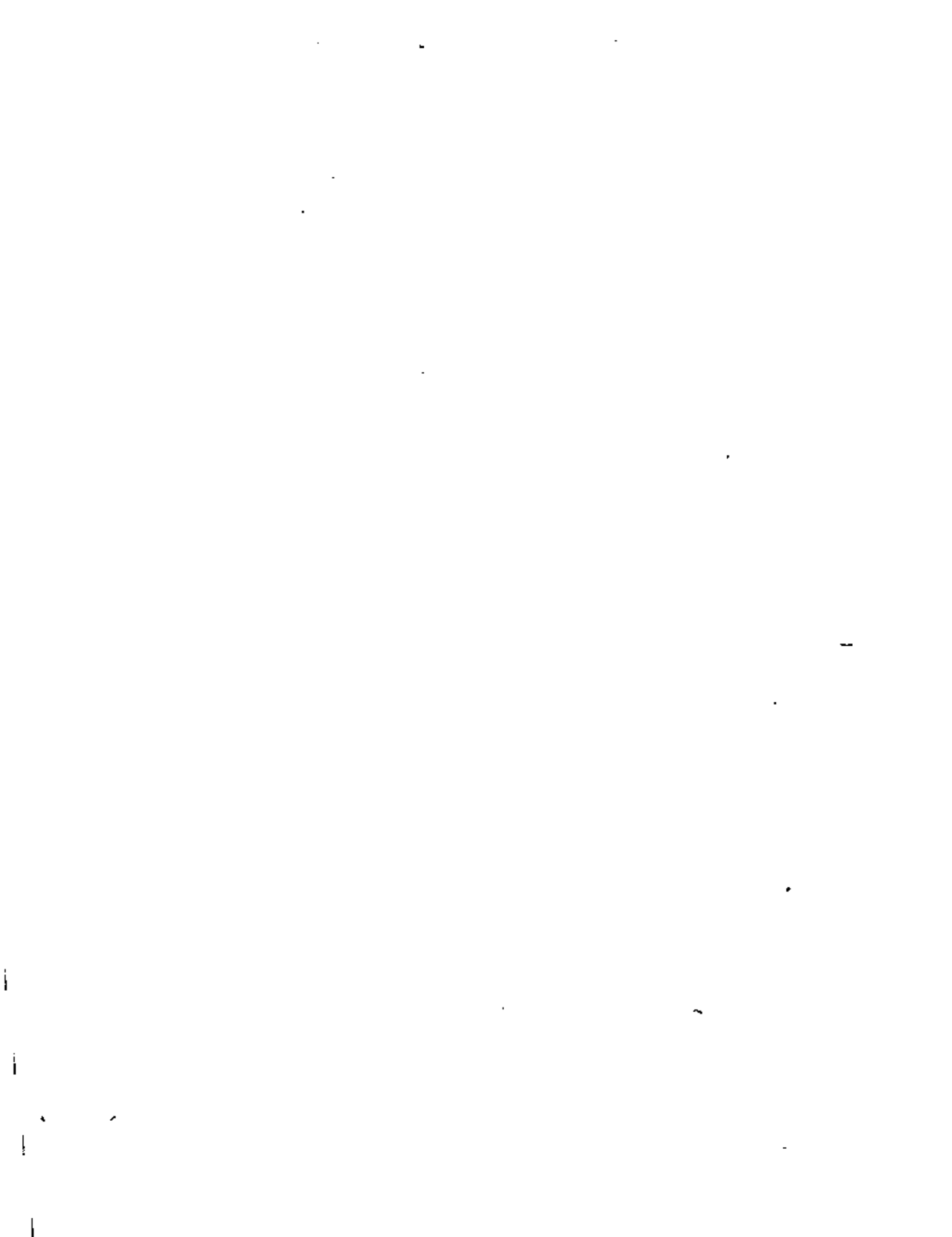
Embrague 14", neumático, 1 disco.

Capacidad de cable 2262 ft. línea de 1/2"

Cabrestantes. (2) cabrestantes neumáticos, montados sobre el eje del malacate de cuchareo. - Uno para aflojar tubería y otro para giro. Rodillos apropiados para guiar las cadenas de giro.

Mesa Rotatoria. Tipo cerrado en baño de aceite engranajes en espiral, accionada por medio de barra de torsión tipo acople universal y un embrague de dos discos de 11" de diámetro. La mesa tiene una abertura de 18" con el buje maestro removido. Puede colgarse hacia adelante para proveer abertura de 27". El buje maestro es de conicidad standard API.

Mástil. Altura de 60' sobre la mesa rotaria, capacidad de 72,000 libras en el gancho, máxima capacidad de 140,000 lbs. El mástil se levanta o baja por medio de cilindros hidráulicos de doble acción equipados con cheques de seguridad equipados con escalera y guías acanaladas que sirven de pistas para el recorrido del gancho - giratorio (swivel)



"Block de Corona" Construida de acero estructural soldado eléctricamente. Equipado con poleas tipo anti-fricción, con capacidad para acomodar bloques viajeros de doble polea con línea indicadora de peso, poleas para cable de cuchareo y poleas para líneas de cabrestante. Las poleas principales en la corona son de 24" de diámetro. Las poleas múltiples son de 18" de diámetro.

Canastilla para almacenar tubería.

Tipo abatible con las siguientes capacidades:

2,000' - Tubería de 4 1/2" 600 m

2,500' - Tubería de 3 1/2"

3,500' - Tubería de 2 7/8"

4,500' - Tubería de 2 3/8"

Estructura. Esta integrada directamente al chasis del camión. Construida con acero estructuras reforzado y soldado eléctricamente. La plataforma - esta cubierta con placa de acero revestida para ofrecer superficie anti-deslizante. Plataforma de paso abisagrada y escalera están integradas.

Controles. Agrupados en una consola al lado izquierdo de la máquina. Incluye tablero de instrumentos. Colocados para permitir una operación conveniente.

GATOS DE NIVELACION.

Total de (4) - (2) de 18" en la parte posterior y (2) de 48" al frente. Están equipados con tubos estabilizadores, Base con gancho giratorio tipo bola y válvulas chequeas automáticas para prevenir fugas. La máquina también tiene (2) gatos tipo tornillo, de gran capacidad.

Caja de herramientas. (2) cajas de gran capacidad - integrados al chasis de la máquina. Una de cada lado.

Tanque de combustible.

Nota: Ver especificaciones del camión.

Plataforma para tubería

Plataforma con bisagras, tipo removible.

Montada en la parte posterior de la perforadora.

Equipado con gatos de tornillo. Cubierta con maderas para parar la tubería.

Toma fuerza. Speedstar, tipo cadena plena torsión, sumergida en aceite, con cadena de 6 hilos paso de 3/4" tipo rodillos con polea loca eléctrica para ajuste. Unidad montada sobre la línea de potencia para transmitir fuerza del motor del camión a la bomba de lodo.

Color.

Perforadora - Color arena

Cabina - " "

Mástil Negro
Chasis Negro

Equipo de norma para operación.

- 1- Gancho giratorio (Swivel) 3" con rodillos guía.
- 1- Manguera para gancho (Swivel) 3"x7' alta presión
- 1- Barra "Kelly" 5 1/4" diam. x 38' con 3 ranuras.
- 1- Buje para "Kelly"
- 1- Cuña para Kelly
- 1- Substituto de "kelly" a gancho (swivel)
- 1- Cable de 3/4" x 350' (Línea "Kelly")
- 1- Cable de 3/4" x 350' (línea levante)
- 1- Cable de 7/16" x 2850' (Línea de cucharón)
- 1- Bloque viajero de doble polea de 17", 40 toneladas de capacidad (línea Kelly)
- 1- Bloque viajero de doble polea de 17", 40 toneladas de capacidad (línea levante)
- 1- Gancho giratorio (Swivel) para línea de cucharón con cierre de seguridad, capacidad de 5 toneladas.
- 1- Indicador de peso, capacidad de 100,000 lbs.
- 1- Cadena del cabrestante para girar tubería.
- 2- Tenazas para aflojar tubería., 2 3/8" a 7" de diámetro, con contrapeso para balancear.
- 2- Madera creosotada, tramos 4"x12" x 10'
- 2- " " " 4"x12" x 12'
- 2- " " " 4"x12" x 6'
- 1- Cinturón de seguridad para subir escalera, tipo doble cierre.
- 1- Caja de herramienta conteniendo, cincelos, punzones, pinzas, martillo, llaves de copa, llaves de boca fija, pistola de engraje y aceitera.

Bomba de Lodo. Marca Gardner-Denver Modelo FY-FXD, 7 1/2"x10" accionada por toma-fuerza, mediante embrague neumático de dos discos de 11" y banda en "V". Capacidad de 487 galones por minuto a 65 golpes por minuto y una presión de 255 libras por pulgada cuadrada-máxima. Bomba equipada con lubricador para varillas de pistón, válvula de seguridad, manómetro de presión tipo Cameron, manguera para succión de 6" x 25' completa con coladera y acople, cámara amortiguadora, válvula para mezcla de lodo, línea de 3" para la descarga.

Cilindro Hidráulico. Para aflojar tubería. Pistón accionado hidráulicamente para apretar o aflojar tubería, completo con cable, rodillos y guías, control para ajustar presión, y manómetro de presión.

Planta de Luz Modelo 6. ODJB-3CR, generador eléctrico de 6,000 vatios, una fase, 60 ciclos, cuatro líneas

THACBA

120/240 volts., A.C., accionada por motor Diesel ONAN Modelo DJB, 4 ciclos, 2 cilindros, 11.8 HP. a 1800 RPM., Máquina equipada con caja de fusibles, 2 salidas auxiliares, 11 lámparas a prueba de vapor, 100 volts. c/u.

NOTA: Unidad no incluye sistema hidráulico de alimentación forzada. Este equipo es opcional.

CAMION. Marca Crane Carrier, 8x4, No. 80P5012, equipado con motor GMC 8V71C, 318 HP. a 2100 RPM transmisión Fuller RT09513 de 13 velocidades, eje delantero Tandem de 39,500 lbs., eje trasero de 50,000 lbs., (4) llantas delanteras, 16.5x22.5 - 16 lonas, (8) llantas posteriores 11.00x20 - 14 lonas, llantas para utilizar dentro o fuera de carretera. Estructura de viga H, 16"x58 lbs., sistema eléctrico de 12 volts., dirección hidráulica frenos de aire, espejos tipo camión, alarma para baja presión de aceite, cabina decentrada tipo plena visión para un hombre, luces de norma, calentador y descarchador, limpiadores operados por aire, manómetros de norma, tacómetro, horómetro, bocina de aire, y doble tanque de combustible con capacidad de 100 galones.

PRECIO U.A.B. FABRICA ENID, OKLAHOMA, EU.A. \$319,243.00

Embarque, sujeto a previa venta, Mayo 1978.

Condiciones de Pago. Se fijarán al formalizar operaciones.

Sin más por el momento y en espera de sus preciables órdenes nos repetimos sus Attos. y Ss. S.

~~A f. e. n. t. a. m. e. n. t. e.~~

TRACTORES Y MAQUINARIA DEL CENTRO, S. A.
ING. OSCAR LOZOYA D.

PORTADRILL

Inc

2201 Blake St. - Denver, Colorado 80205

Telephone: 303/623-6231 - Telex: 4-5781

PROPOSAL NO. 70726-599

PAGE 1 OF 2

August 2, 1977

LA OLMECA, S.A.
CULIACAN 123-1006
MEXICO 11, D.F. MEXICO

QTY	DESCRIPTION	UNIT PRICE	TOTAL
2	PORTADRILL Model TKT/1 "Contractor" as per technical data sheet TKT-03077 (formerly. 04025) with the following changes: <ul style="list-style-type: none">. Add 1500 ft. 3/8" Sand Line. 4-1/2" x 24 ft. kelly.. Delete Stabbing Board and pipe rack. MOUNTED ON International Harvester Model F-5070 truck powered by GM 8V71T Detroit Diesel engine, 10-speed main transmission, full torque power take-off, 18 - 22.5 20 Ply front tires, 11.00 x 22 12 ply rear tires with on/off highway tread 20,000 lb. front axle, 44,000 lb. rear axle, power steering and air brakes.		
	RIG AND TRUCK FOB DENVER, COLORADO	\$237,660.00	\$475,320.00
2	7-1/4 x 10 FY-FXD Gardner Denver skid mounted mud pump complete with 25 feet of 6" suction hose with screen, 2-1/2" discharge line and hose, shear relief valve, surge chamber and pressure gauge powered by GM 4-71 Detroit Diesel engine with v-belt drive.		
	PUMP - FOB DENVER, COLORADO	\$ 38,395.00	\$ 76,790.00
	LIST OF ACCESSORIES (attached)	<u>US 276,055.00</u>	
	SUB TOTAL		<u>\$ 83,953.60</u>
	TOTAL FOB DENVER, COLORADO		\$636,063.60
	Inland Freight		<u>4,350.00</u>
	TOTAL FOB U.S. BORDER		\$640,413.60

Continued - Page 2

PROPOSAL

PORTADRILL Inc

2201 Blake - Denver, Colorado 80205
Telephone: 303/623-6231 - Telex: 4-5761

PROPOSAL NO. 70726-599

PAGE 2 OF 2

SHIPPING INFORMATION (per unit)

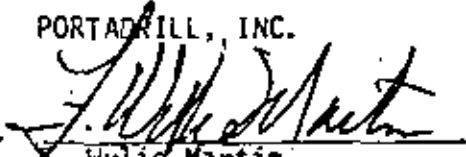
DRILL AND TRUCK - 45000 GROSS POUNDS
ACCESSORIES - 15700 GROSS POUNDS

PRICES VALID TO SEPTEMBER 1, 1977

DELIVERY - MARCH, 1978

TERMS - Letter of Credit or Financing to be arranged.

PORTADRILL, INC.


F. Wylie Martin
International Sales

gs

PROPOSA





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



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS
COMPLEMENTO

ING. JOSE LUIS SANCHEZ LAZCANO

OCTUBRE, 1980

GARDNER-DENVER COMPANY

INTERNATIONAL DIVISION

41

ORDER NO.
DATE
INVOICE NO.
CONTRACT NO.

ORDER TO INVOICE NO. 019006
INVOICE DATE 1-10-79

1

SOLD TO

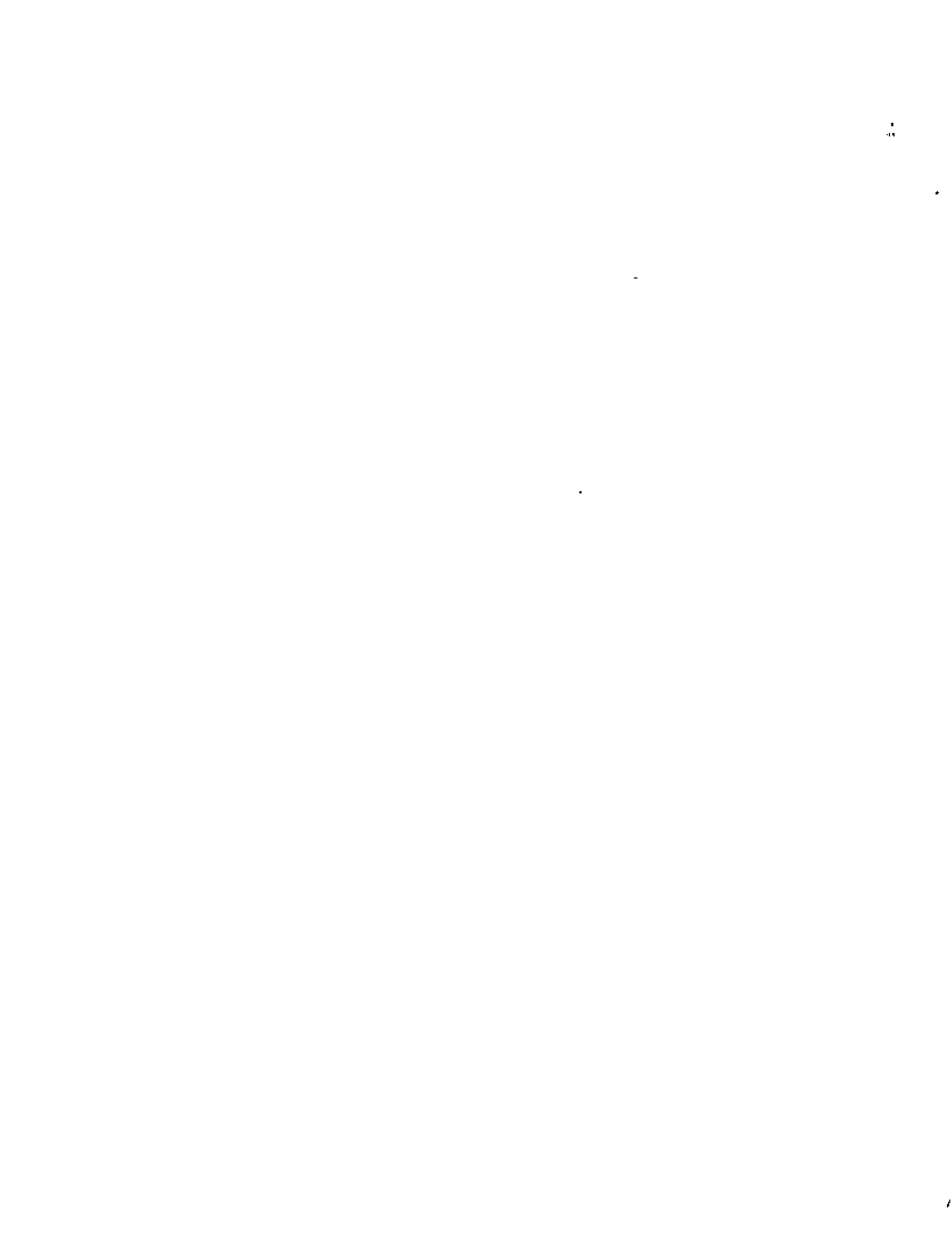
LA OLMECA, S.A.
Culiacán 123, 1006
México 11, D.F.

REPLY TO:

Same c/o Andres Mounetou y Cía.
2702 Sta. María
Laredo, Texas

SHIPPED TO AND DESTINATION

ITEM	QUAN.	PART NO.	DESCRIPTION	UNIT PRICE	AMOUNT
			PORTABLE ROTARY DRILL RIG MODEL 2000 CARRIER MOUNTED GROUP I		
			POWER TAKE-OFF: MODEL 2001 Eight Strand chain type, split shaft, full torque, 2-1/4" ten-spline shaft.		
			POWER TRANSFER: MODEL 602 Quad chain type, enclosed in oilbath, including master clutch.		
			ROTARY TABLE: MODEL RT-10 10" Opening, ring gear and pinion type, lubricated by splash type system, hydraulically retractable leaving 19" opening in frame.		
			DRAWWORKS: MODEL 2004 Unitized Double drum type with Twin-Disc P0214, two plate, air clutch and double 6" x 22" brake band with 690 sq. in. net braking area each drum, complete with three speed transmission, lebus grooving and drawworks cover, rated 15,000 lbs. maximum single line pull, bare drum.		
			SANDREEL: Model SR-20 with P0311 air clutch, 5" x 20" brake band and independent controls. Unit is mounted above and forward of main drawworks. Maximum spooling capacity 3000' 3/8" 6 x 19 wire line with 2000' wire line.		



GARDNER-DENVER COMPANY

INTERNATIONAL DIVISION

BUYER'S
 ORDER NO. AND DATE
 REQUISITION NO.
 CONTRACT NO.

REFER TO
 INVOICE NO. 019006
 INVOICE DATE 1-10-79

SOLD
 TO

REPLY TO:

SHIPPED TO
 AND
 DESTINATION

2

ITEM	QUAN.	PART NO.	DESCRIPTION	UNIT PRICE	AMOUNT
			<p><u>PULLDOWN:</u> Heavy duty hydraulic chain feed type, energized by a variable volume pressure compensated pump with planetary gear reduction full air clutch, and holdback system.</p> <p><u>PULLDOWN:</u> 2" pulldown chains.</p> <p><u>MAST: MODEL 2006</u> 58' overall length, tubular four-way construction, electrically welded to withstand maximum stress and channel kelly guides, rated 75,000 lbs. capacity model 2500 racking board.</p> <p><u>KELLY BAR:</u> 4-1/2" OD x 24' long, round and fluted with three 1" drive pins.</p> <p><u>SWIVEL:</u> 4-1/2" ID watercourse, King - 25WG.</p> <p><u>TRAVELING BLOCKS:</u> 1 set (2) 137900, 17-1/2" triple sheave blocks rated 30 ton capacity.</p> <p><u>ROTARY TABLE TRANSMISSION:</u> Five speed forward, one reverse for rotary drilling with torque tube drive gives 25 to 215 RPM rotary speeds.</p>		



GARDNER-DENVER COMPANY

INTERNATIONAL DIVISION

3

ORDER AND DATE
 REQUISITION NO.
 CONTRACT NO.

ORDER TO
 INVOICE NO. 019006
 INVOICE DATE 1-10-79

SOLD TO

REPLY TO

3

SHIPPED TO AND DESTINATION

ITEM	QUAN.	PART NO.	DESCRIPTION	UNIT PRICE	AMOUNT
			<p><u>MAST CYLINDERS: MODEL 2015</u></p> <p>Twin double acting chrome plated telescoping hydraulic cylinders for raising and lowering mast. Utilizes Vickers hydraulic pump driven by the transfer case to supply oil to mast raising cylinders. Vickers hydraulic control valve used to control fluid to cylinders. Each cylinder features a safety check valve to prevent mast from free falling in event of hydraulic failure.</p> <p><u>MUD PUMP: MODEL FD-FXX.</u></p> <p>Gardner-Denver, 5" x 10" Duplex pump completely slush fitted and installed with belt drive, air actuated clutch and rod oiler.</p> <p><u>LEVELING JACKS:</u></p> <p>One set (4) hydraulic leveling jacks, two (2) 9-5/8" x 5" piston x 4' stroke installed on front of trailer, two (2) 9-5/8" OD x 5" piston x 24" stroke installed on rear of trailer complete with controls and "L" type level.</p> <p><u>RIG-UP EQUIPMENT</u></p> <p><u>ROD HOOK:</u></p> <p>Single swivel rod hook rated 50,000 lbs.</p> <p><u>CATHEADS:</u></p> <p>Foster Model 35AH breakout cathead, hub mounted installed on side opposite operator with hand controls, rope divider and catline guide rollers.</p>		

•

GARDNER-DENVER COMPANY

INTERNATIONAL DIVISION

4

ORDER NO. AND DATE
 REQUISITION NO.
 CONTRACT NO.

REFER TO INVOICE NO. 019006
 1-10-79
 INVOICE DATE

PAID TO

REPLY TO:

SHIPPED TO AND DESTINATION

4

ITEM	QUAN.	PART NO.	DESCRIPTION	UNIT PRICE	AMOUNT
		<u>CATHEAD:</u>			
			Foster Model 86 AH spinning cathead, hub mounted, installed on operator's side with air hand controls, rope divider and catline guide rollers.		
		<u>TONGS:</u>			
			One set (2) 184406 Baash Ross Type "D" rotary and casing tongs, complete with hanger and six (6) lug latch jaws for size range 2-7/8" to 8-5/8 OD.		
		<u>COUNTERWEIGHTS:</u>			
			One set (2) balanced counterweights installed in mast complete with wireline, sheaves and counterweight guides.		
		<u>ELEVATORS:</u>			
			One (1) Baash-Ross Type C-30W, center latch elevator, rated 30 ton capacity.		
		<u>LINKS:</u>			
			#166156 one set (2) 1-1/4" x 30" Webb Wilson Magnaweld elevator links rated 50 ton capacity per set, with one (1) "Mayhew" elevator yoke installed on above links.		
		<u>WEIGHT INDICATOR:</u>			
			One (1) Martin-Decker WS-8 hydraulic piston type complete with sensor unit mounted on deadline between drums. (reads both drilling and hoisting line) and stationary panel mounted in full view of driller.		

GARDNER-DENVER COMPANY

INTERNATIONAL DIVISION

5

DATE
REQUISITION NO.
CONTRACT NO.

REFER TO
INVOICE NO. 019006
INVOICE DATE 1-10-79

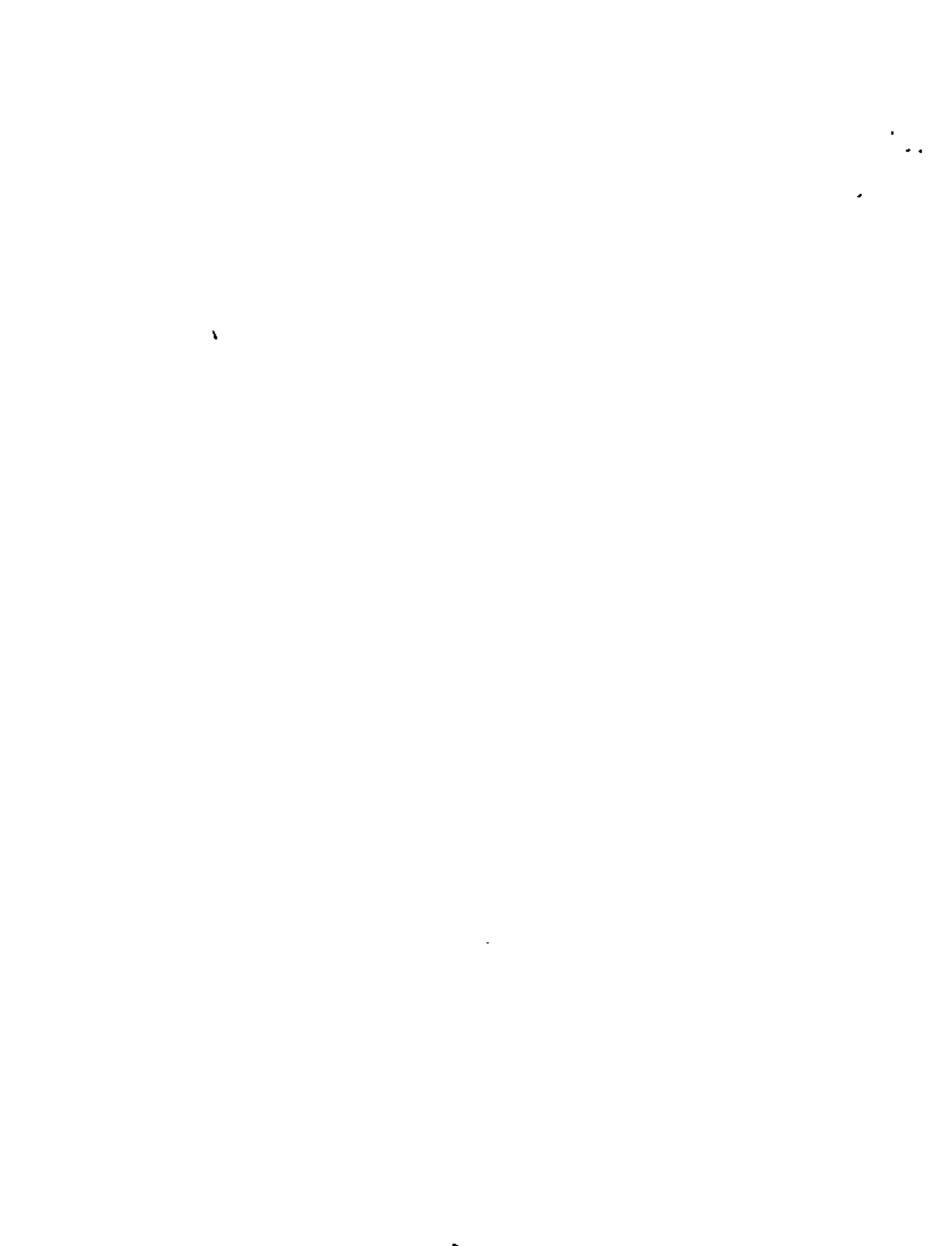
SOLD TO

REPLY TO

5

SHIPPED TO AND DESTINATION

ITEM	QUAN.	PART NO.	DESCRIPTION	UNIT PRICE	AMOUNT
			<p><u>RIG LIGHTS:</u></p> <p>One (1) mast string with five (5) #800, 100 watt mast lights, receptacle box, leads and fittings. Floor and engine lights, two (2) #600, 515DL, 300 watt with leads, plugs and fittings. Three wire grounded system.</p> <p><u>LIGHT PLANT:</u></p> <p>Diesel, one (1) Kohler Model 4CM061 electric generator, 4,000 watt single phase, 50 cycle, four wire, 120/240 volt A.C., powered by Lister St1 diesel engine, four cycle one cylinder, 1800 RPM.</p> <p><u>FRAME:</u></p> <p>Heavy duty structural steel, electrically welded into a rigid one piece frame.</p> <p><u>CONTROLS:</u></p> <p>Grouped at operator's position for one man operation including air hand and foot throttles.</p> <p><u>STANDARD OPERATING EQUIPMENT INCLUDED WITH DRILL</u></p> <p>5/8" Diameter 18x7 non-rotating Drilling and Hoisting Line</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 - Kelly Drive Bushing for 4-1/2" O.D. Kelly 1 - Kelly Head Adapter (swivel to kelly) 1 - Kelly Adapter (kelly to drill pipe) 1 - Set Slips 1 - Mud Pump Manifold with Demco 2" shear relief valve, 161434 Martin Decker 1000 lb. mud pump pressure gauge and surge chamber 1 - 5" x 20" Suction Hose with fittings and foot screen 1 - 2-1/2" I.D. Standpipe with fittings 		



GARDNER-DENVER COMPANY

INTERNATIONAL DIVISION

ORDER NO. AND DATE

REFER TO INVOICE NO.
INVOICE DATE

019006
1-10-79

6

PROVISION NO.
CONTRACT NO.

PAID TO

REPLY TO

SHIPPED TO AND DESTINATION

6

ITEM	QUAN.	PART NO.	DESCRIPTION	UNIT PRICE	AMOUNT
			STANDARD OPERATING EQUIPMENT - Cont.		
			1 - 2-1/2" I.D. Pressure Hose (rotary hose) with fittings		
			1 - 2-1/2" I.D. Pressure Hose (hinge hose) with fittings		
			1 - 1-1/4" I.D. 30' Washdown hose		
			1 - Standard Tool Box located at rear of Drill Bed		
			1 - Set (2) mud flaps installed on truck		
			1 - Set Clearance lights and reflectors installed on drill bed		
			1 - Drill Rig primed and painted standard Gardner-Denver Color		
			2 - Parts Lists and Lubrication Charts, Model 2000		
2	1		DRILL CARRIER		
			One (1) Crane Carrier Model DR2084AM (8x4) Carrier, equipped as follows:		
			8' - 0" wide chassis		
			16" @ 58 lb. Manten WF H-beam frame		
			Cummins 350 Diesel Engine, with MVS overnor		
			Fuller Five speed transmission - spicer auxillary 4 speed		
			Rockwell SRDD single-speed tandem, rated 44,000 lbs. capacity		
			1 - Timken FF-92 front axles, spring suspension, rated 36,000 lbs. capacity		
			Heavy duty radiator cooling system		
			Automatic shutters		
			Full air brakes, all wheels, 12 CFM Compressor		
			4 - 15-22.5 16-ply highway tread front tires, Goodyear Super Hi-Miler nylon		
			8 - 11.00 x 20 14-ply mud and snow tread, Goodyear Hi-Miler extra grip nylon rear tires		
			Spoke type wheels		
			Power steering		
			Heater and defroster, Farr dry type air filter		
			Standard one-man steel cab		
			2 - Maxi parking brakes on rear		
			Bostrom seat, Rubber fender skirts		

.

.

.

.

.

.

.

GARDNER-DENVER COMPANY

INTERNATIONAL DIVISION

REFER TO INVOICE NO. 019006
INVOICE DATE 1-10-79

7

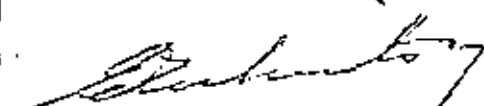
TO ORDER AND DATE
REQUISITION NO.
CONTRACT NO.

SOLD TO

SHIP TO

SHIPPED TO AND DESTINATION

7

ITEM	QUAN.	PART NO.	DESCRIPTION	UNIT PRICE	AMOUNT
			COMPLETE RIG AND ACCESSORIES - F.O.B. DALLAS, TEXAS		\$278,555.
			DRILLING ACCESSORIES:		
			DRILL PIPE - COLLARS - ADAPTERS		
75			3-1/2" O.D. Range 1, Grade "D", .368 wall - plain ends with 4-3/4" O.D. 3-1/2 API I.F. tool joints welded on - steel thread protectors installed.	376.00	28,200.
			COMPLETE DRILL RIG AND ACCESSORIES FURNISHED TO ABOVE SPECIFICATIONS - F.O.B. LAREDO, TEXAS		\$308,655.
			TERMS: As agreed		
			DELIVERY: Immediate		
			"We certify the prices shown on this invoice are true and correct, that the goods are new and not of used or second hand nature and are of United States origin."		
			 GARDNER-DENVER COMPANY		



DE MEXICO, S. A.
Tubulares y Forjados

Liverpool 88-2ª Piso México 6, D. F.
Tel. 525-45 80 Telex. 017-73-155

Agosto 10 de 1978

A NUESTROS ESTIMABLES CLIENTES

ASUNTO: Nuevos precios de Barrenas para Perforación.

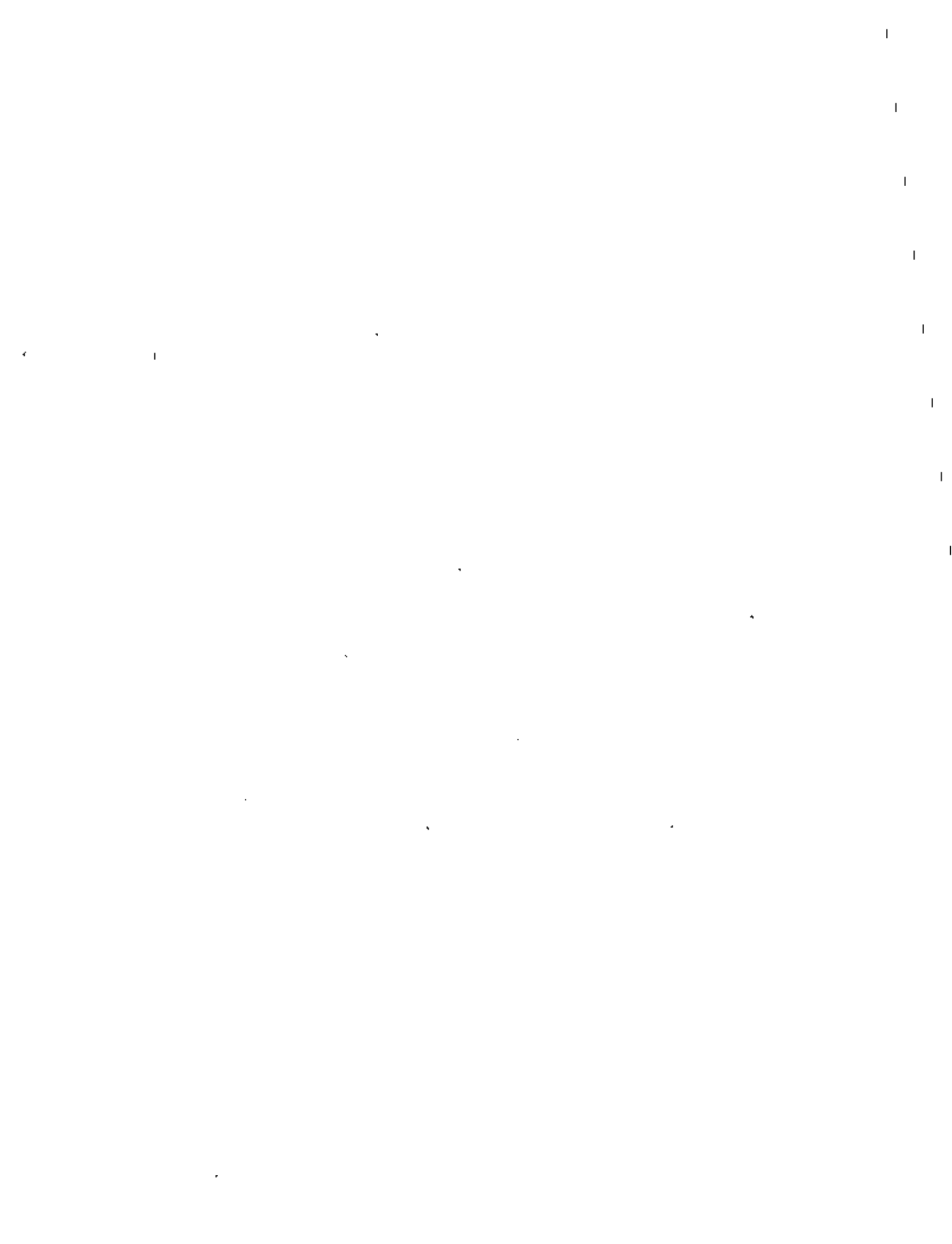
Ante la imposibilidad de seguir absorbiendo los incrementos constantes -- que han experimentado los costos de la materia prima y mano de obra que usamos en la fabricación de Barrenas para Perforación, nos vemos en la imperiosa urgencia de aumentar los precios de éstas, en la medida en que nos han afectado.

Adjuntamos nuestra Lista de Precios que entró en vigor a partir del día 1º DE AGOSTO DE 1978.

Confiando en que estarán conscientes de la necesidad de esta determinación, no dudamos seguir contando con su preferencia; aprovechamos la presente ocasión para reiterarnos a sus apreciables órdenes.



LIC. JORGE CASTRO VARGAS
DIRECTOR COMERCIAL



PRECIOS - BARRENAS
" P U B L I C O "

En vigor a partir del 1º de Agosto de 1978

TIPO JET

MEDIDA:

5 5/8"	\$ 10,545.00
6"	11,355.00
6 1/2"	12,320.00
8 1/2"	15,404.00
9 1/2"	18,451.00
12 1/4"	26,231.00
14 3/4"	41,845.00

CONDICIONES DE VENTA ACTUALES:

Menos 2% descuento por pago a 15 días, fecha de factura

Neto a 30 días

Más el 4% de I.S.T.H.

Financiamiento: 1.5% mensual después del 31vo. día;

Máximo: 90 días

Precios sujetos a cambio sin previo aviso

Vigencia de cotizaciones: 30 días

L. A. B. Nuestra Planta



DE MEXICO, S. A.
Tubulares y Forjados

Liverpool 85-2º Piso México 6, D. F.
Tel 525-45-80 Telex. 017-73-155

PRECIOS - BARRENAS
" P U B L I C O "

En vigor a partir del 1º de Agosto de 1978

LINEA X

MEDIDA:

8 1/2"	\$	19,317.00
9 1/2"		23,062.00
12 1/4"		32,312.00
14 3/4"		50,097.00

CONDICIONES DE VENTA ACTUALES:

Menos el 2% descuento por pago a 15 días fecha factura

Neto a 30 días

Más el 4% de I.S.T.M.

Financiamiento: 1.5% mensual después del 31vo. día;

Máximo: 90 días

Precios sujetos a cambio sin previo aviso

Vigencia de cotizaciones: 30 días

L. A. B. Nuestra Planta

DE MEXICO, S. A.
Tubulares y Forjados

Liverpool 88 2° Piso México 6, D. F.
Tel. 525-45-80 Telex. 017-73-155

PRECIOS - BARRENAS
" P U B L I C O "

En vigor a partir del 1° de Agosto de 1978

BARRENAS DE CHUMACERA TIPO JOURNAL,
CON DIENTES DE CARBURO DE TUNGSTENO

MEDIDA:

6 1/2"	\$	59,626.00
8 1/2"		76,720.00
9 1/2"		93,356.00
12 1/4"		135,108.00

CONDICIONES DE VENTA ACTUALES:

Menos 2% descuento por pago a 15 días, fecha de factura

Neto a 30 días

Más el 4% de I.S.T.M.

Financiamiento: 1.5% mensual después del 31vo. día-

Máximo: 90 días

Precios sujetos a cambio sin previo aviso

Vigencia de cotizaciones: 30 días

L. A. B. Nuestra Planta

DE MEXICO, S. A.
Tubulares y Forjados

Liverpool 85-2º Piso México 6, D. F.
Tel. 525-46-80 Telex. 017-73-155

PRECIOS - BARRENAS
" P U B L I C O "

En vigor a partir del 1º de Agosto de 1978

TIPO INDUSTRIAL

SEIS-BLAST

MEDIDA:

4 1/2" TIPO H \$ 5,448.00

ROTA-BLAST

MEDIDA:

9" TIPO H 15,401.00

CONDICIONES DE VENTA ACTUALES:

Menos el 2% descuento por pago a 15 días fecha de factura

Neto a 30 días

Más el 4% de I.S.I.M.

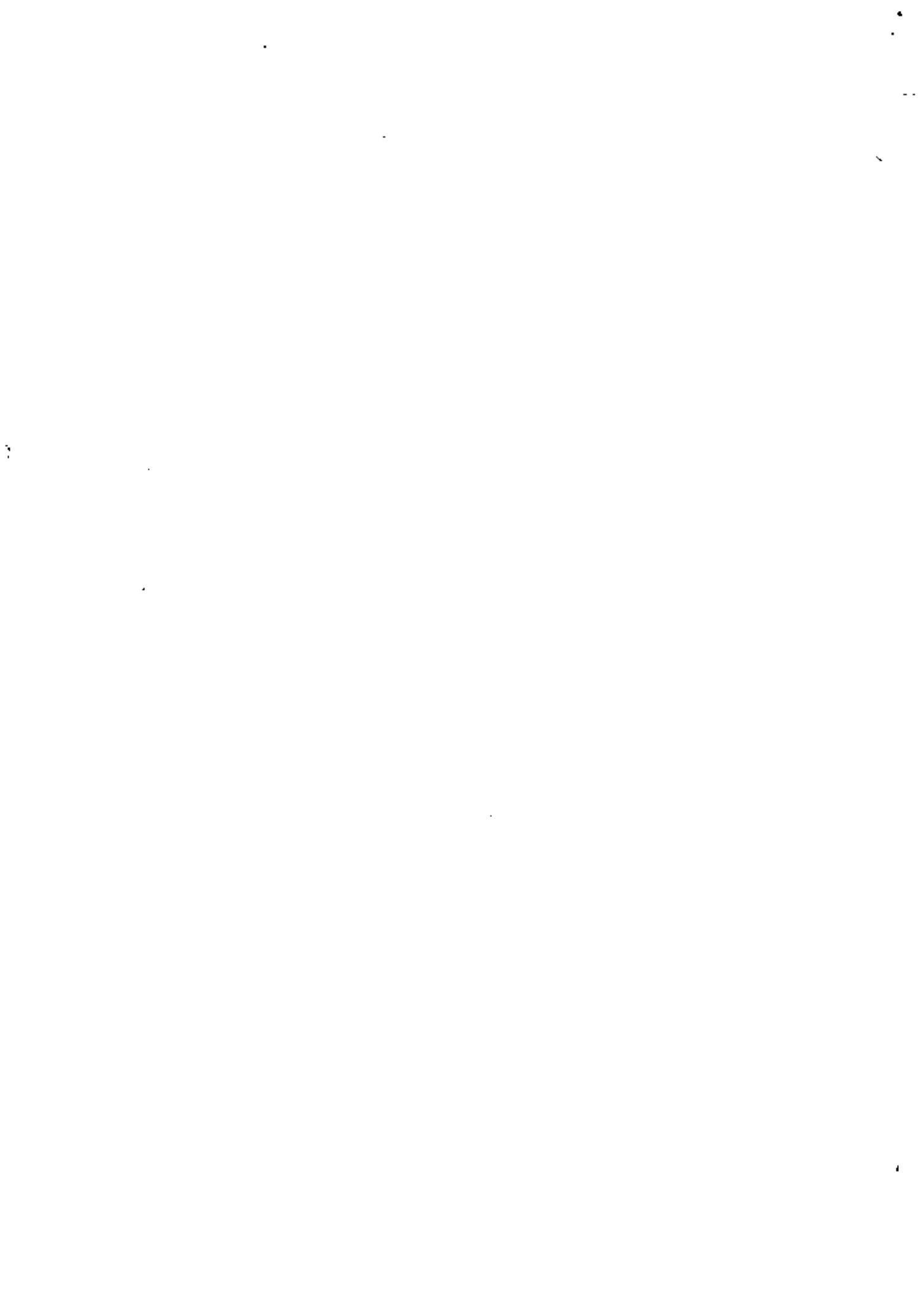
Financiamiento: 1.5% mensual después del 31vo. día;

Máximo: 90 días

Precios sujetos a cambio sin previo aviso

Vigencia de cotizaciones: 30 días

L. A. B. Nuestra Planta





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

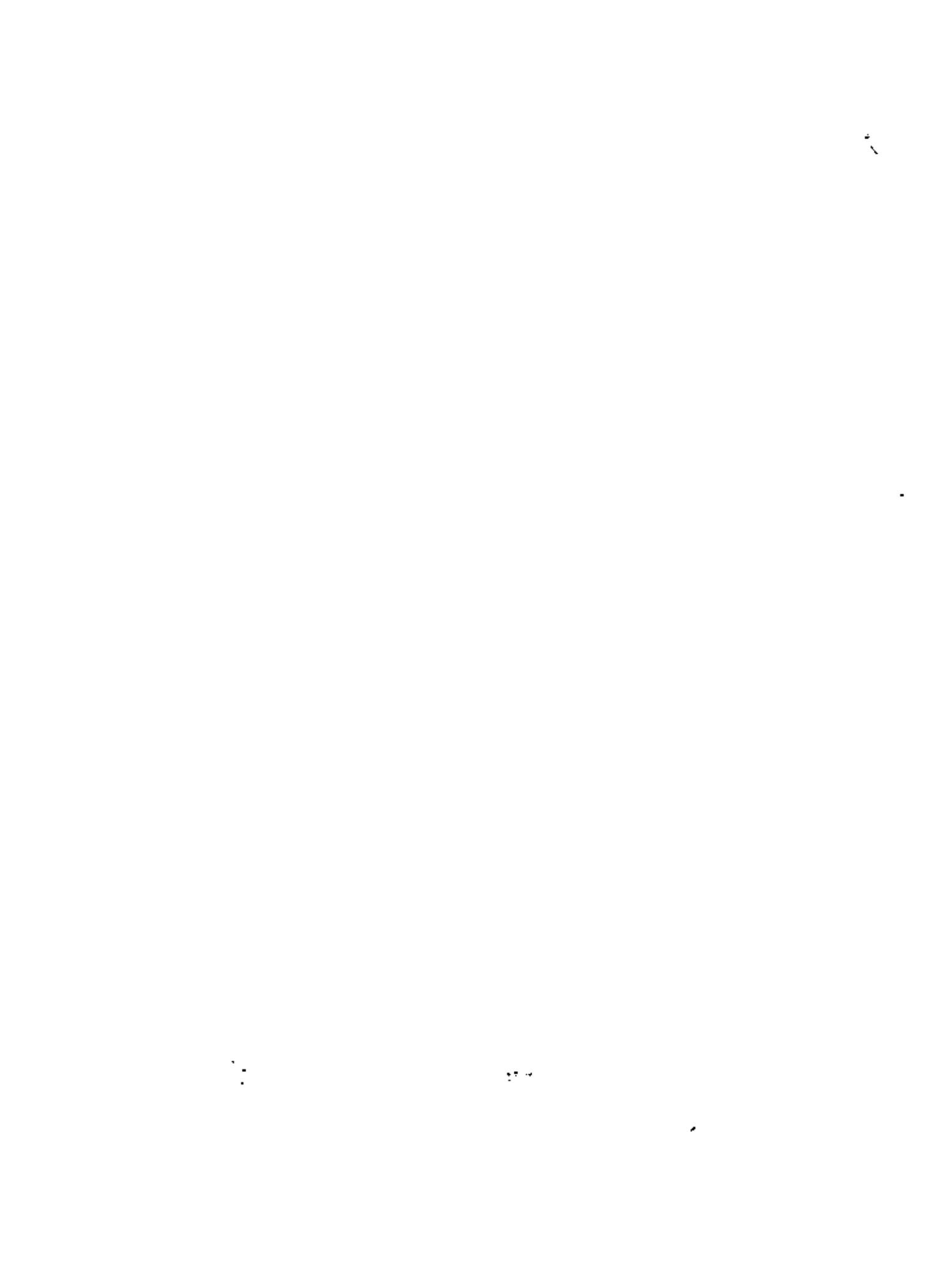


PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

TECNICAS DE PERFORACION PERCUSION SIMPLE

ING. RAFAEL JIMENEZ GRANADOS

OCTUBRE, 1980



PERCUSIÓN SIMPLE

La perforación es una de las técnicas más antiguas y la historia consigna obras de este tipo anteriores a la Era Cristiana; por ejemplo, el "Pozo de Jacob", que fué excavado hasta una profundidad de 50 metros hace aproximadamente 3,500 años y el de José en el Cairo, que alcanzó la profundidad de 90 metros y fué perforado empleando como herramienta una guía - en forma de espiral.

Se dice que los egipcios 500 años A. de C. empleaban una especie de corona de perforación para cortar la roca y que sus dientes estaban formados por piedras preciosas y cuarzo; pero es a los chinos a quienes se atribuye el haber construído el primer equipo de perforación aprovechando el principio de la caída libre

En el año 1600 A. de C. idearon el "mástil con pértiga de resorte", sentando con éste los principios básicos de la perforación de tipo percusión, ya que... "subían y bajaban una herramienta metálica suspendida de un cable de rota, (calamus rudentum, palmácea común en Asia) y que... "de -- cuando en cuando vaciaban algunos cubos de agua al pozo para ablandar la roca y reducirla a pulpa... " y ... " a ciertos intervalos bajaban al pozo un recipiente tubular para extraer la rezaga..."

Es importante consignar que en Artois, provincia del Norte de Francia, en 1126 fué perforado un pozo que resultó brotante y ha estado fluyendo desde entonces.

Con este motivo los pozos que al perforarse, sus aguas fluyen, re--

ciben el nombre de "Pozos Artesianos".

También fueron los chinos quienes aunque en forma elemental idearon varios tipos de herramientas usadas en los equipos actuales y construyeron mástiles, juntas de tuberías y llegaron a cementar sus ademes. Pero no fué sino hasta el Siglo XIX en el que aprovechando el principio de los chinos se desarrollaron nuevas técnicas en la perforación.

En sus inicios fué el hombre quien utilizó su fuerza para impulsar las herramientas dentro del pozo; posteriormente utilizó acémilas, pero siempre empleando mástiles con pértiga de resorte.

Alrededor del primer tercio de ese Siglo, hubo algunos cambios notables en la perforación; se patentaron las tijeras de perforación de dos eslabones, que incrementaron la profundidad de corte; se dió a conocer el uso del agua a presión para levantar la rezaga, que fundó las bases del sistema de perforación en inversa, y se empleó la máquina de vapor, que transformó el panorama: se inventaron máquinas, torres, herramientas, etc.

Fué hasta pasada la mitad del Siglo cuando las ideas y experimentos iniciados 20 o más años atrás, empezaron a dar sus frutos. Se patentó la perforadora de circulación inversa y por este método se perforó un pozo de 2,197 pies de profundidad.

También se patentaron y pusieron en práctica las primeras perforadoras de tipo rotatorio, aplicándolas a la minería y paralelamente se inició el empleo de las barrenas de perforación. Pero a la terminación de ese período se tuvieron los mayores logros respecto a la perforación rotatoria y

las experiencias cobradas por colapsos, dieron origen al empleo de los lodos como fluidos de perforación.

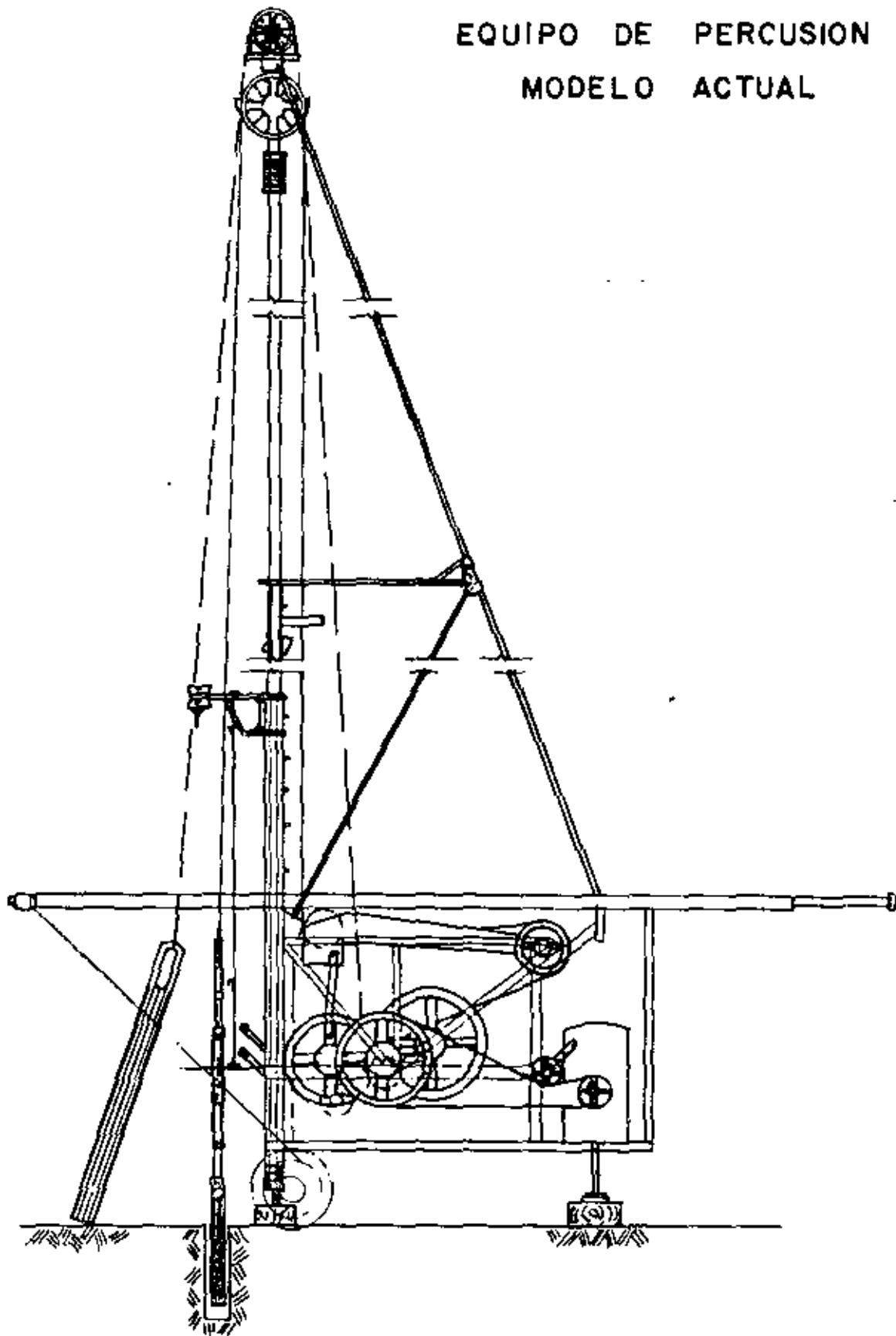
Todos los fracasos, desvelos y experiencias anteriores tuvieron su recompensa al alcanzarse el éxito deseado en el campo Spindletop de Beaumont, Tex. donde a la profundidad de 1,040 pies brotó el petróleo en tal abundancia que la producción de ese pozo fué de 100,000 barriles diarios.

Esta fecha, 10 de Enero de 1901, marcó el inicio de la curva ascendente de los equipos rotatorios a tal grado que 50 años después, los pozos de petróleo perforados en los Estados Unidos por el sistema de percusión, sumaban únicamente el 17 1/2 por ciento y actualmente el hablar de ese tipo de máquinas en la perforación de pozos de petróleo es casi como referirse a las primeras locomotoras de vapor.

El método de la "pertiga de resorte" con algunas variaciones fué aplicado en diversas partes del mundo a la perforación de pozos con varios propósitos; inicialmente a la extracción de salmuera.

Los americanos lo emplearon en sus primeras perforaciones en la forma más simple. Sobre una horqueta encajada en el suelo, se montaba el extremo mas grueso y corto de una rama de mas o menos 40 pies, flexible, recta y resistente que se anclaba en el piso. Al extremo libre, se ataban el cable de perforación y a éste la herramienta de corte. Otros cables con estribos eran atados a esa misma parte de la rama para producir el impulso necesario para bajar la herramienta al pozo. Este principio, con sus modificaciones fué utilizado en la construcción de equipos con los que se perfora

EQUIPO DE PERCUSION
MODELO ACTUAL



ron los primeros pozos en Estados Unidos, recibiendo el nombre de técnica de perforación americana. Utilizando este método el Coronel Drake perforó el Titusville, Pa. en 1859, el primer pozo petrolero, perforándose muchos pozos someros en la misma área.

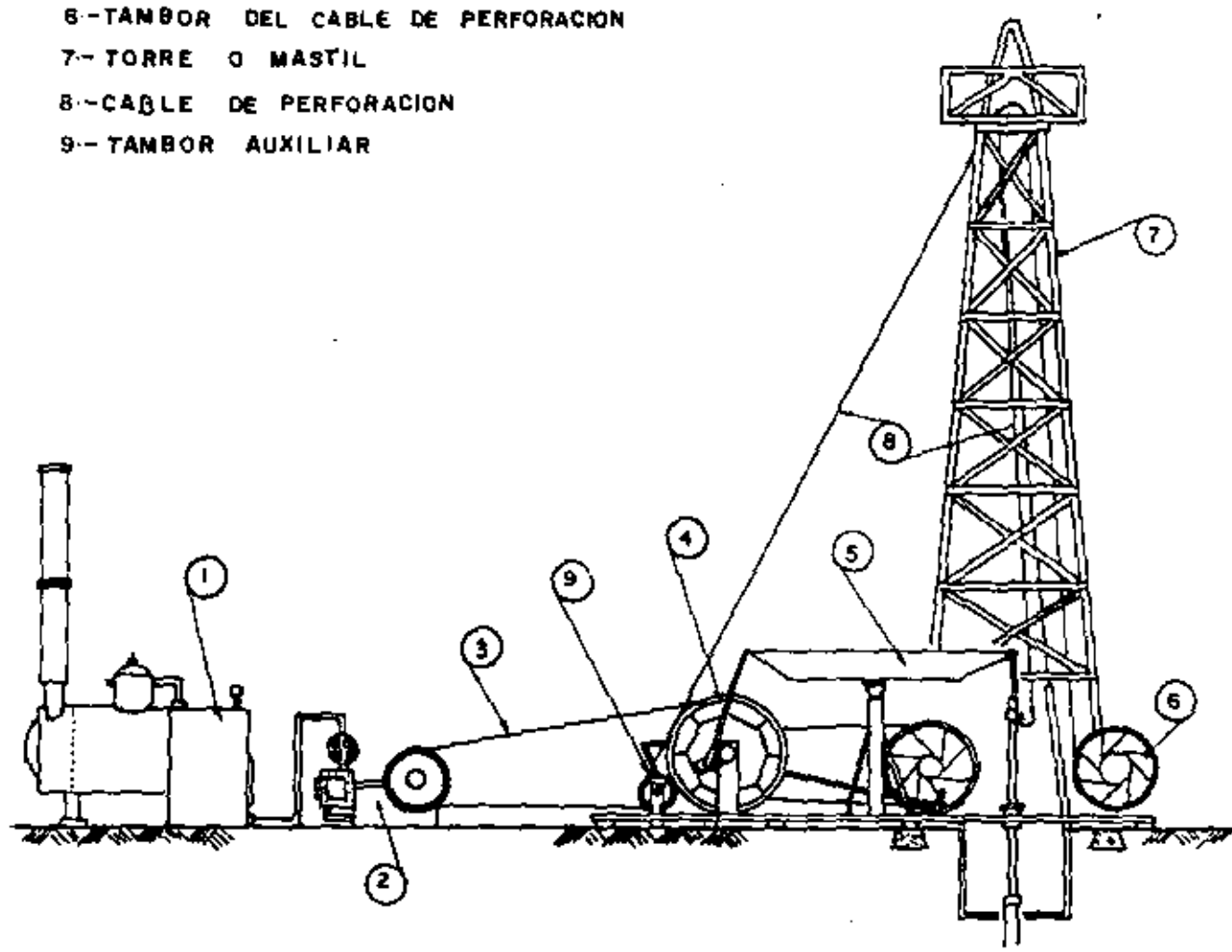
La máquina de vapor fué aplicada a esta clase de trabajos, utilizándose en su forma más simple: una máquina reversible común de un pistón controlado por una simple válvula de corredera, se utilizaba para producir un movimiento reciprocante al cable de perforación desde una gran polea llamada "polea de transmisión", la flecha metálica se conectaba al extremo del balancín de la biela por medio de una manivela. El cable de perforación se ataba al extremo opuesto al balancín, de tal manera que se accionara con cada revolución de la polea de transmisión. Figura I.

Los primeros equipos fueron pequeños y ligeros; para izar la herramienta se empleaba un simple trípode hecho de tres tiras de madera unidas por un extremo que soportaba una polea de madera o fierro. El cable de perforación pasaba sobre la polea y la energía era aplicada en el extremo libre por un malacate de operación manual o mecánico.

Con equipos semejantes se perforaron pozos en zonas donde las condiciones geológicas fueron favorables, pero hubo necesidad de hacerles algunos cambios, agregar nuevas partes que imponían los nuevos trabajos, hasta que finalmente se llegó al equipo de perforación a cable o de percusión al que se llamó "Equipo Estandar Americano".

EQUIPO DE PERCUSION
MODELO ANTIGUO

- 1-- CALDERA
- 2-- PISTON
- 3-- BANDA DE TRANSMISION
- 4-- VOLANTE
- 5-- BALANCIN
- 6-- TAMBOR DEL CABLE DE PERFORACION
- 7-- TORRE O MASTIL
- 8-- CABLE DE PERFORACION
- 9-- TAMBOR AUXILIAR



Los equipos que conocemos actualmente, constan principalmente de un bastidor de acero estructural soldado eléctricamente en el que se instalan: la unidad de potencia, sistemas de transmisión, malacates para perforación, cuchareo y entubado, el balancín y la biela; el mástil o torre telescópica, compuesto de dos secciones fácilmente izables, que descansan sobre la estructura al ser transportado; polea y cables para los trabajos y maniobras. Figura 2.

La máquina se opera a través de controles localizados generalmente en la parte posterior derecha de la unidad. Para su transporte rápido se monta sobre un chasis de camión o remolque. Figura 3.

Al conjunto de herramientas para realizar los trabajos de perforación y/o pesca o rescate se le llama sarta y se compone de trépano o herramienta de corte, barretón o barra de peso, tijeras de perforación y portacable giratorio, al cual se conecta el cable de perforación. Cuando se trata de una sarta de pesca, en lugar de la herramienta de corte se coloca el pescador diseñado para ese trabajo específico, y en vez de las tijeras de perforación se utilizan las de pesca cuya carrera o desplazamiento es aproximadamente 8 veces mayor que la de perforación; además el portacable es fijo, para poder asegurar el "pescado" o herramienta que se encuentra dentro del agujero. La unión de las herramientas que forman la sarta se realiza mediante el enroscado de un piñón y una caja, empleando llaves especiales con boca de sección cuadrada. FIGURA 4

Antes de la fundación del Instituto Americano del Petróleo (American

2000

TARIMA DE OPERACIONES

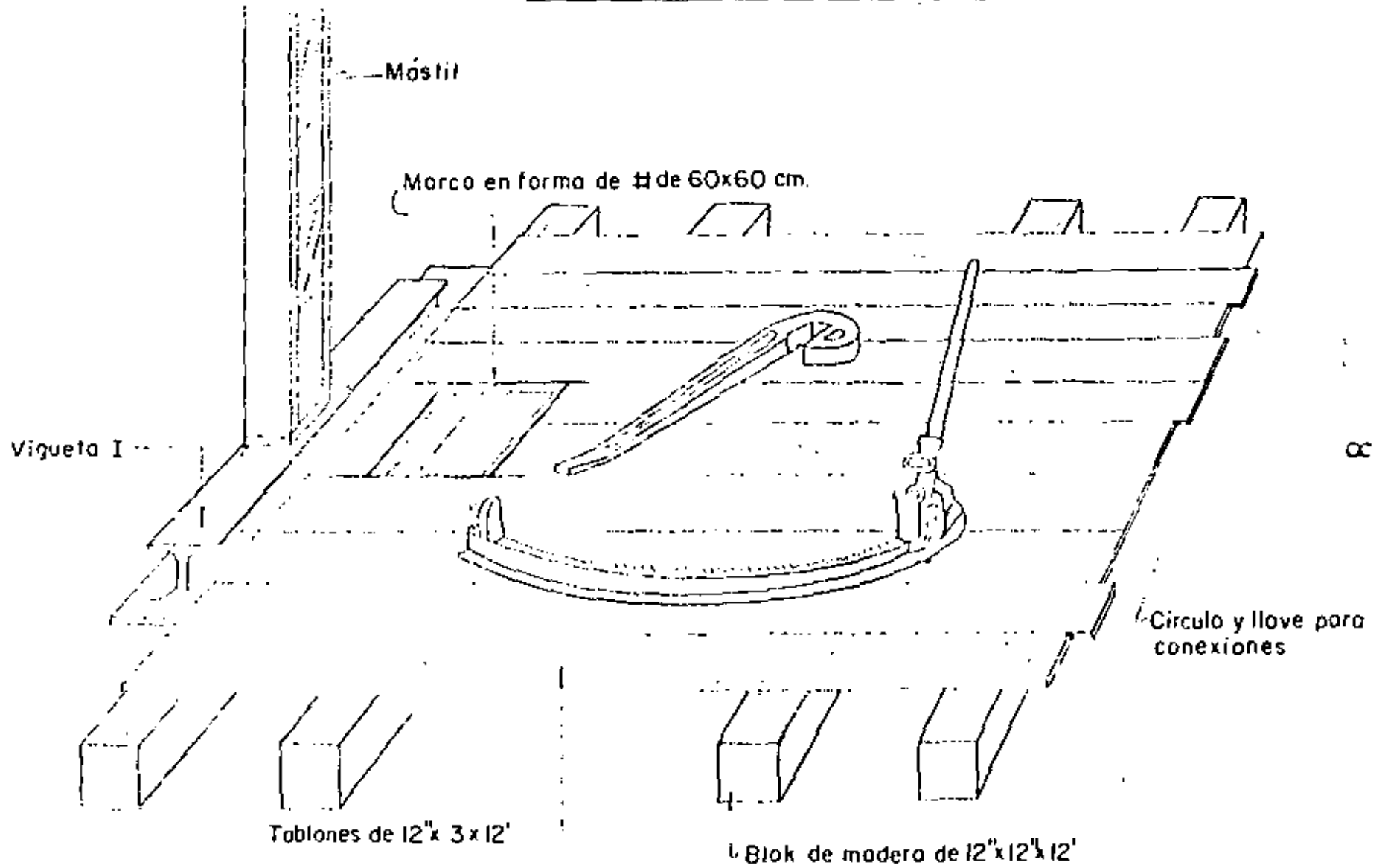
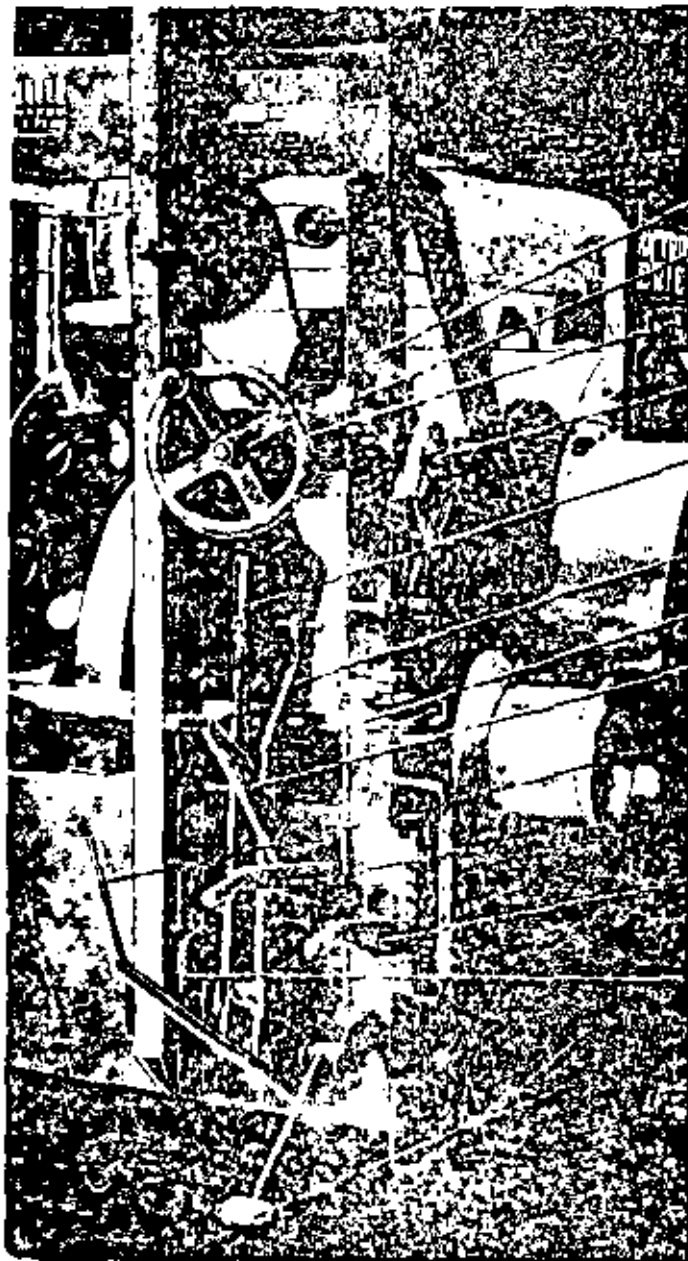


FIGURA 1

3

CONTROLES DE OPERACION



- Interrupor de encendido.
- Interrupor del arrancador - eléctrico.
- Volante manual para embobinar el cable.
- Acclerador del motor.
- Control de embrague de marcha adelante.
- Palanca de embrague de perforación.
- Palanca de embrague de contra marcha.
- Palanca del tambor de cucharreo y freno.
- Cambio de tambores de herramientas y ademado.
- Freno del tambor de ademado.
- Freno del tambor de perforación.
- Embrague del guinche del mástil.
- Pedal del acclerador del motor.

FIGURA 3

Petroleum Institute) A. P. I., cada fabricante de herramientas diseñaba sus propias cuerdas o roscas, generalmente rectas; con filetes rectangulares, angulares etc. y con un número arbitrario de hilos por pulgada. Las cuerdas rectas propiciaron frecuentes pescas y abandono de pozos. Actualmente, las uniones, piñón y caja, son cónicas - en forma de conos truncados - y en el caso de herramientas de perforación de percusión, tienen una diferencia de una pulgada de la base menor a la base mayor. Las mas comunes son $2\frac{3}{4}'' \times 3\frac{3}{4}''$; $3\frac{1}{4}'' \times 4\frac{1}{4}''$; $4'' \times 5''$ todas seguidas del número "7" que indica el número de hilos por pulgada. Las medidas anteriores se correlacionan con los espesores, longitudes y pesos de las sarta y éstas a su vez con la capacidad de los equipos.

Una de las partes complementarias de la sarta de perforación es el cable. Inicialmente se utilizó el de "manila", tanto para los trabajos de perforación como de cuchareo y maniobras con las pescas inherentes.

Una de sus funciones era la de absorber y amortiguar el impacto de la herramienta. Después se utilizó también con desventaja el de acero, por su poca flexibilidad. Para lograrlo se intercalaba un tramo de cable de manila entre las herramientas y el cable de acero, con lo cual se absorbían -- los impactos y las vibraciones de la sarta sobre la roca.

Actualmente se emplea ventajosamente el de acero con alma de fibra, que tiene mayor durabilidad y resistencia.

Los cables y su uso datan de la mas remota antigüedad. Se sabe que los egipcios hace 3500 años tejían cables a base de cuero, papiro y fibras



de algunas palmas.

Ya se mencionó que los chinos también lo usaron hace muchísimos años.

Con mucha frecuencia se hace mención a los "cables de manila" como si procedieran de ese lugar. En efecto, la fibra con la que se fabricaba el cable de manila es del "abacá", planta perteneciente a la familia de las musáceas, parecida a la palma, y que crece casi exclusivamente en las Islas Filipinas y ya transformada en cables se exportaba principalmente por el puerto de Manila. Por su resistencia y durabilidad siempre ocupó el primer lugar y el segundo le fué cedido al henequén, que como se sabe procede del Estado de Yucatán.

Se define como cable a una serie de hilos o alambres que al agruparse mediante un torcido determinado forman un torón y al grupo de torones ordenados en cierta forma o "construcción" permiten una combinación óptima de resistencia, flexibilidad y seguridad para determinado servicio.

Los cables se surten bajo Especificaciones API. Deben ser de acero arado mejorado, preformado con alma de fibra.

El "acero arado mejorado" es el de mayor resistencia y durabilidad y posee grandes cualidades para resistir la abrasión; Su resistencia es aproximadamente de 15% mayor al de acero arado.

Un cable "preformado" es aquel cuyos alambres y torones tienen un terminado helicoidal, de manera que al cortarse o romperse los alambres permanecen en su lugar.

El "alma" del cable sirve como soporte a los torones que están en-

• 100

• 100

rollados a su alrededor y se fabrica de diversos materiales dependiendo del trabajo al cual se va a destinar el cable; es decir, el alma del cable está formada por un torón que puede ser de acero o de fibra, vegetal o sintética.

Los cables, generalmente se fabrican en torcido "regular" o torcido "lang". En el torcido regular los alambres del torón están torcidos en dirección opuesta a la de los torones del cable; y en torcido lang están torcidos en la misma dirección. Figuras 5 y 6.

Los cables con torcido regular son mas fáciles de manejar, menos susceptibles a la formación de cocas y mas resistentes al aplastamiento y distorsión.

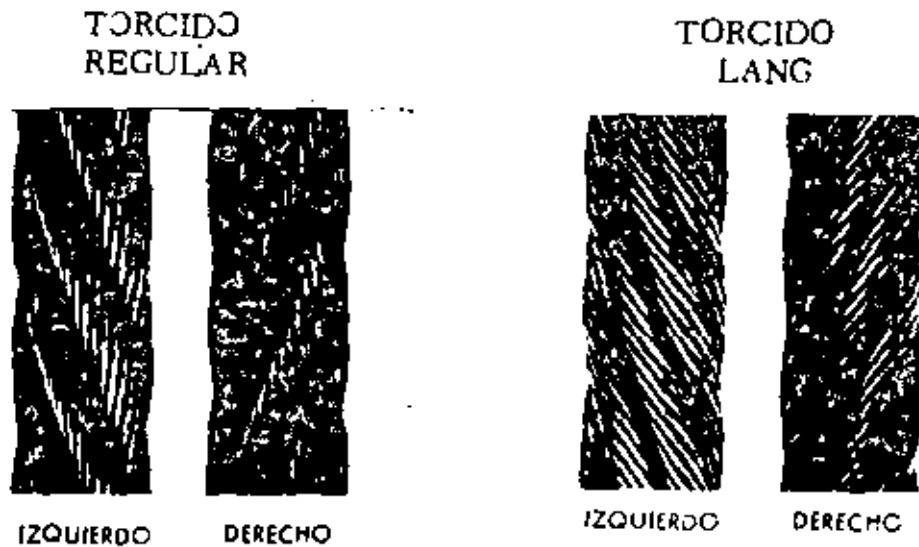


FIGURA 5

FIGURA 6

Además de los torcidos mencionados los cables se fabrican en torcido "derecho" y torcido "izquierdo".



"CONSTRUCCIONES DE CABLE"



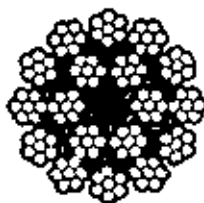
CONSTRUCCION 6 x 21- ALMA DE FIBRA.
TORCIDO IZQUIERDO, PARA PERFORACION.

FIGURA 7

CONSTRUCCION 6 x 7-ALMA DE FIBRA
TORCIDO DERECHO PARA CUCHAREO.



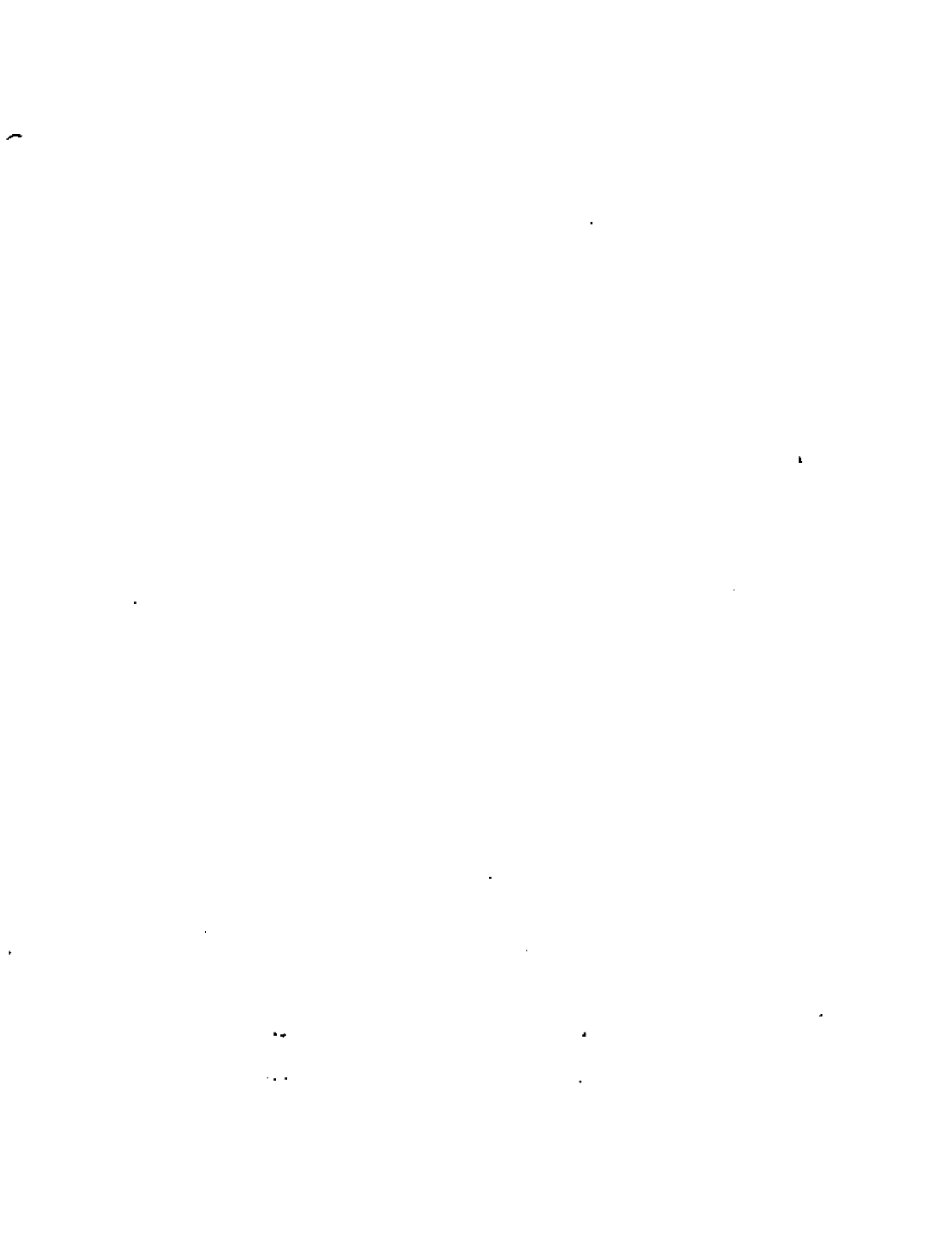
FIGURA 8



CONSTRUCCION 18 x 7 ALMA DE FIBRA.
NO ROTATORIO PARA ADEMADO.

FIGURA 9

Para los trabajos de perforación de "percusión simple" se utiliza el torcido izquierdo para la perforación; el torcido derecho para la cuchara y el llamado "no rotatorio" para los trabajos de ademado. En este caso los torrones interiores tienen un torcido lang izquierdo y los exteriores, regular derecho; con lo cual se evita que el cable gire en cualquier sentido.



AMORTIGUADOR DE DISCOS



FIGURA 10

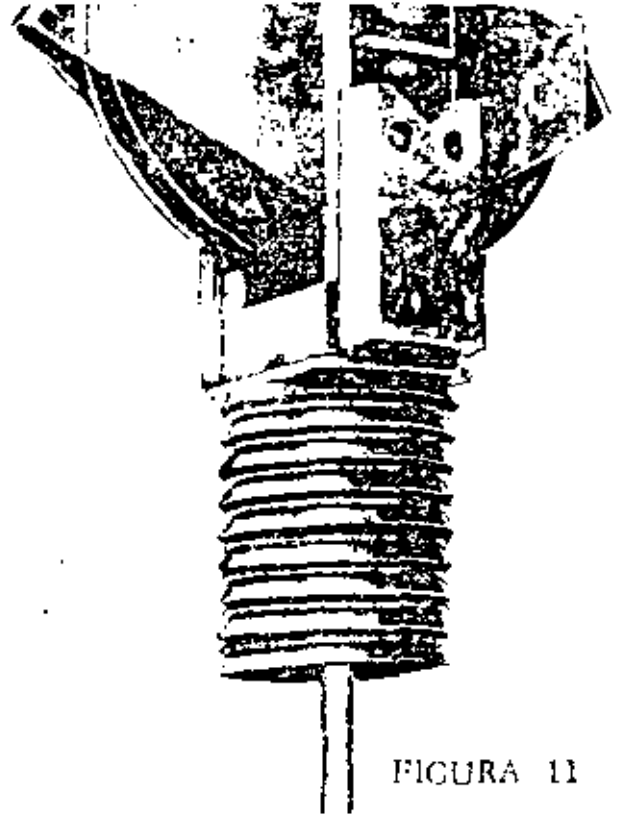


FIGURA 11

FIGURA 12 DISCOS DE HULE Y
PLATO DE LAMINA DE ACERO.



Las construcciones usuales para estos trabajos son: 6 x 21 para perforación; 6 x 7 para cucharco y 18 x 7 para el adomado; todos con alma de fibra, con las fatigas de ruptura correspondientes. Figuras 7, 8 y 9.

Cabe repetir que al intercalar un tramo de cable de manilla en la línea de perforación, tenía como finalidad la de absorber los impactos de la herramienta sobre el material por atravesar, sobre todo cuando éste era roca.

Para ello, actualmente los equipos cuentan con un dispositivo coloca

do en el extremo superior del mástil, formado generalmente por discos de hule compacto que descansan o se apoyan sobre platos de lámina de acero, los que a su vez, también lo hacen sobre un resorte lo suficientemente resistente para amortiguar dichos impactos. Figuras 10, 11 y 12.

Además en el cuerpo de la sarta se haya intercalada una herramienta que recibe el nombre de "percutor" o tijeras. Figura 13

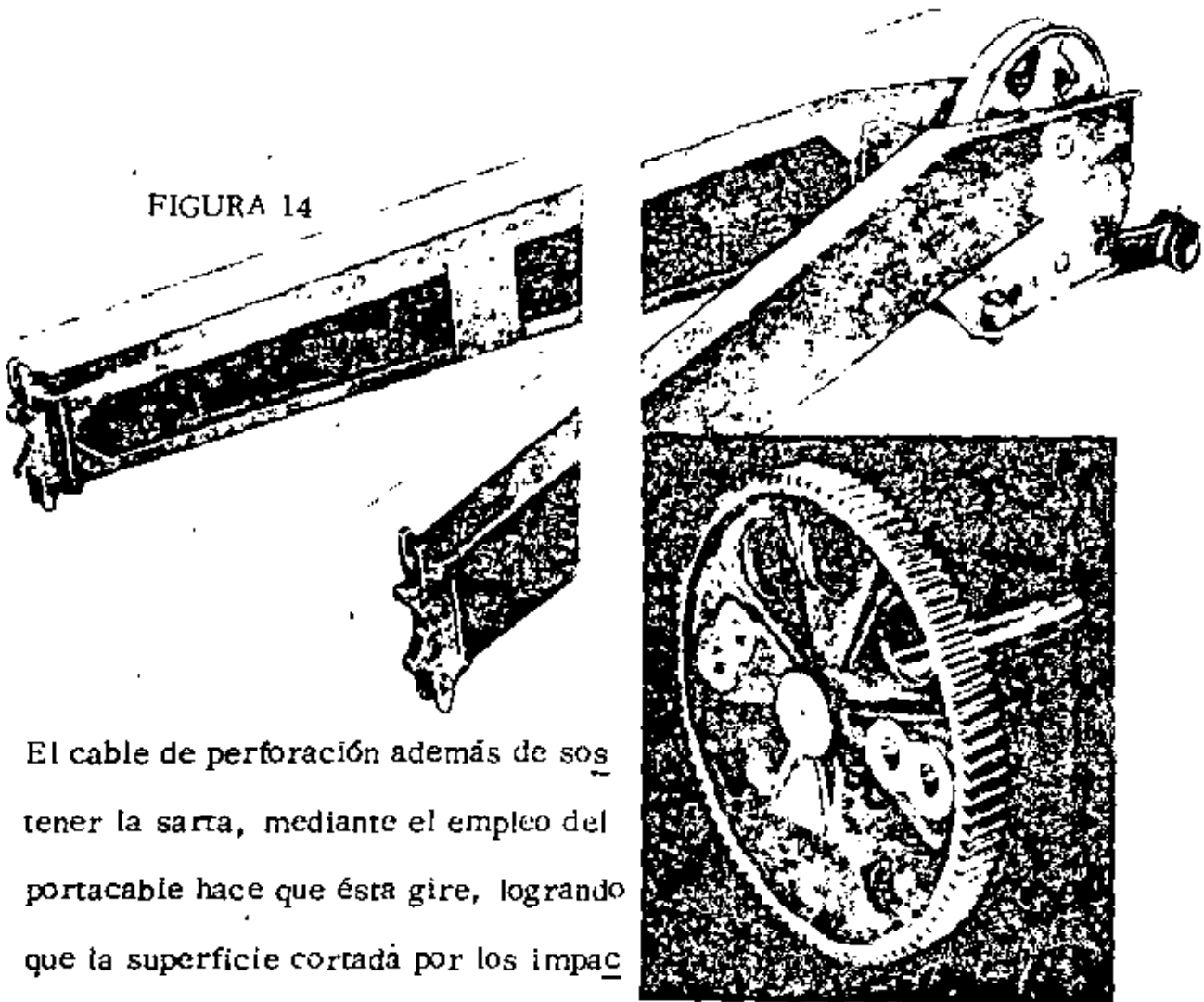


Su uso evita pegaduras de la sarta cuando se perforan materiales plásticos. Se colocan siempre entre el portacable y el barretón, excepto cuando se trata de operaciones de pesca, en las que se conectan después del barretón. Se construyen de acero de aleación forjadas de una pieza y los eslabones son unidos por soldadura a forja y posteriormente sometidos a un tratamiento térmico para uniformizar su estructura molecular. La longitud de la carrera de las tijeras varía de 114.3 mm a 203.2 mm (4 1/2 a 8") y su peso y diámetro están correlacionados con el de la sarta y capacidad del equipo.

FIGURA 13

BALANCIN Y ENGRANE DE PERCUSION

FIGURA 14



El cable de perforación además de sostener la sarta, mediante el empleo del portacable hace que ésta gire, logrando que la superficie cortada por los impactos del trépano, sea la de un círculo.

Para ello es necesario combinar la acción que imparte el engrane de percusión a través de la biela con cada movimiento del balancín y producir el fatigazo o coscorroneo equivalente al producido con la pértiga de resorte. Figura. 14.

NOMBRES Y FUNCIONES DE LAS PARTES DE UN TREPANO

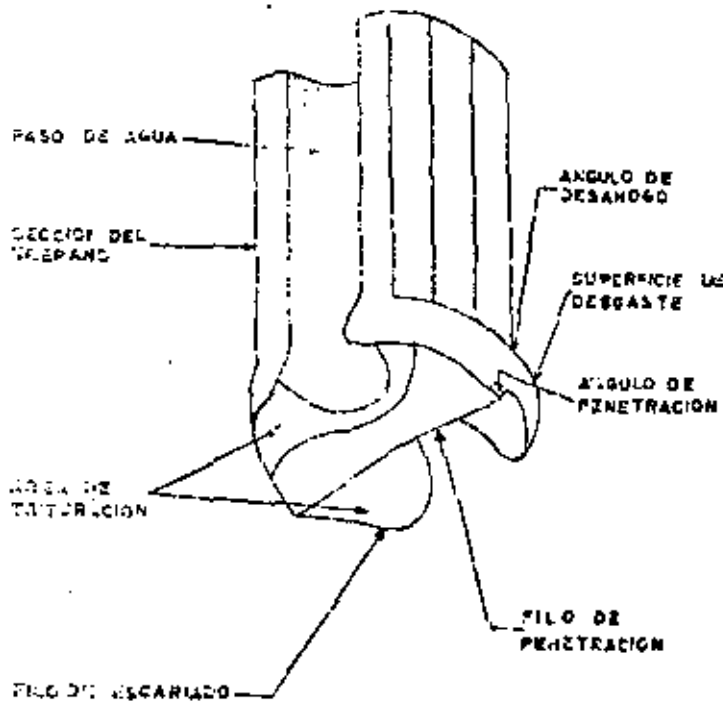


FIGURA 15

Pasos o Vías de Agua. - Son las partes huecas del trépano por las que el agua y el material triturado pasa cuando se está perforando.

Sección del Trépano. - Es la parte inferior del trépano - mostrada en la figura.

Áreas de Trituración. - También llamadas de batido son las del fondo del trépano y

se encargan de desmenuzar el material cortado.

Filos de Escariado. - Son las aristas exteriores y forman parte de la circunferencia del extremo del trépano. Se localizan a los lados de las vías de agua.

Ángulo de Desabogo. - Es la conicidad en las superficies de desgaste.

Superficie de Desgaste. - Es la parte que no tiene ángulo de desabogo y está en contacto con las paredes del pozo.

Ángulo de Penetración. - Es el extremo de la superficie de corte que rompe el material.

Filo de Penetración. - Es el encargado de penetrar y romper el material en el fondo del pozo. Puede ser cóncavo, recto o convexo.



Para lograr un buen avance en los trabajos de perforación, se hace necesario que la herramienta de corte tenga el afilado correcto; para ello se dan las siguientes sugerencias. Figura 15. BIS

SUGERENCIAS PARA EL AFILADO DE TREPANOS.

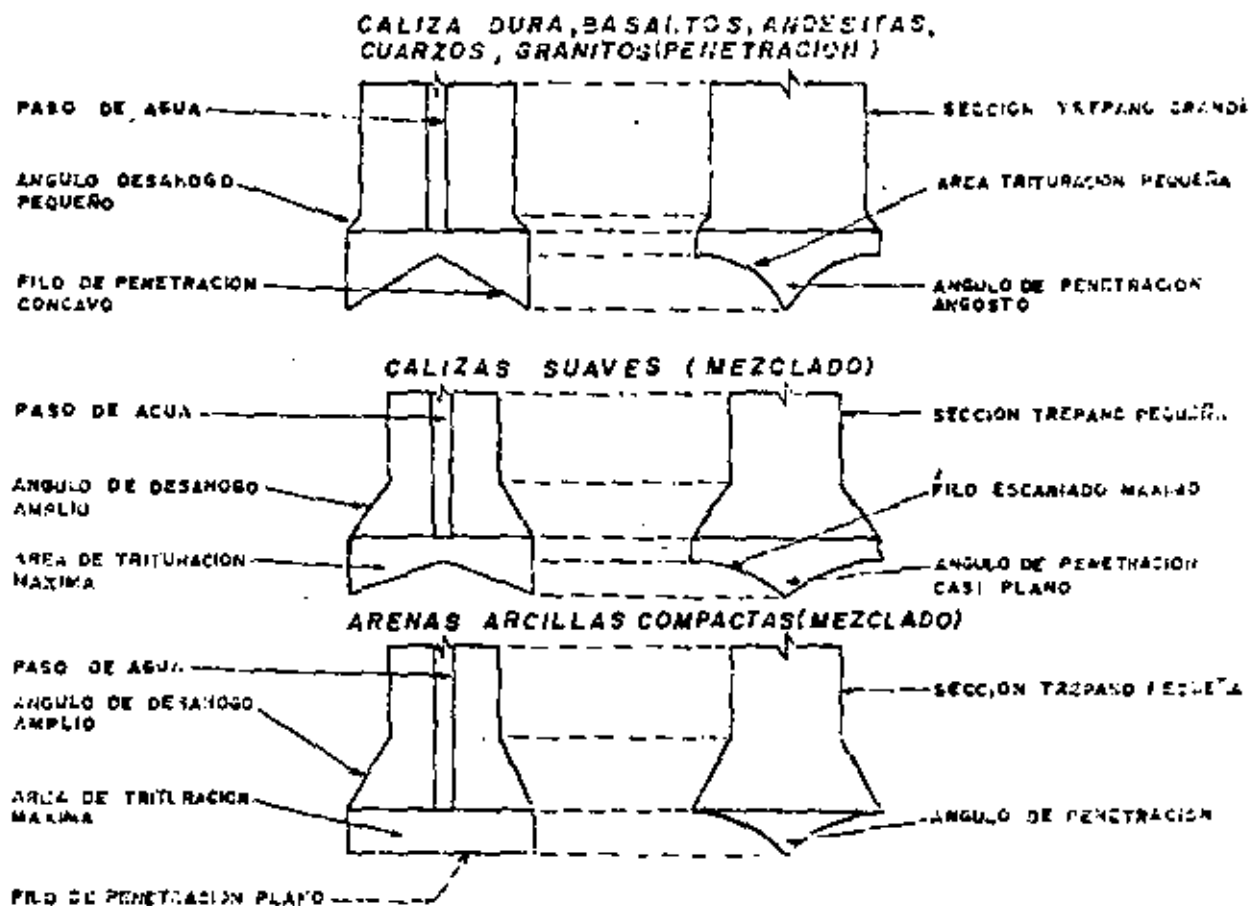
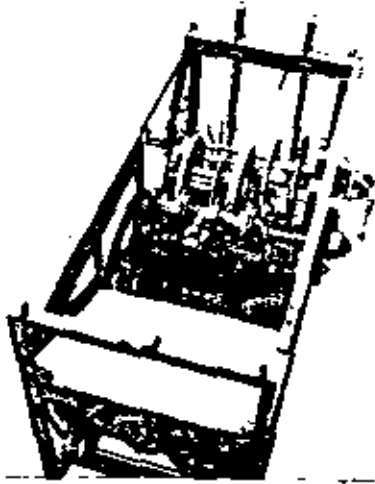


FIGURA 15 BIS



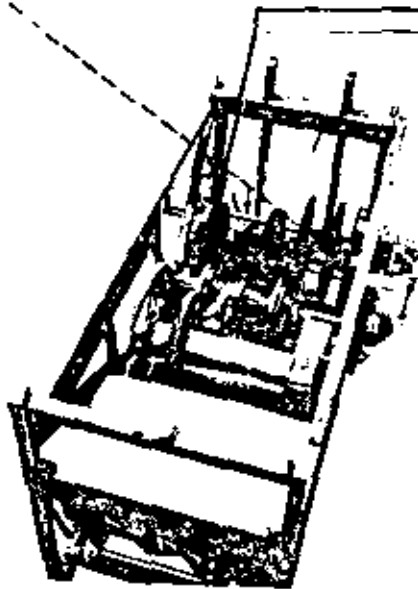
MALACATES PRINCIPAL Y AUXILIARES.



Malacate principal con tambor y repartidor para cable de herramientas. Es operado desde la parte posterior derecha del equipo a través de los controles correspondientes con avance y retroceso según se requiera el freno de fricción.

FIGURA 16

Malacate auxiliar con tambor para ademado. Es impulsado por el mismo engrane que mueve el malacate principal.



Malacate auxiliar con tambor diseñado para cuchareo y limpieza a velocidades relativamente altas. Tiene control de embrague y freno independientes.

FIGURA 17

BARRETÓN O BARRA MAESTRA FIGURA 18.-

Es una barra redonda de acero, con un piñón en su parte superior y una caja en la inferior. Su función es proporcionar el peso necesario a las herramientas de perforación y guiar éstas en forma vertical dentro del agujero. Generalmente son lingotes forjados de una pieza; pero hay casos en que sus extremos, el piñón y la caja, son forjados de acero al alto carbón, soldados y tratados térmicamente.

Las longitudes, diámetros y pesos de los barretones o barras maestras deben guardar una relación entre las herramientas que forman la sarta y la capacidad del equipo para lograr un trabajo rápido y eficiente.

GRAPAS GOLPEADORAS FIGURA 19 .- Cuando se sigue la práctica, no recomendable de hincar las tuberías de ademe, se instalan las grapas golpeadoras en el cuadrado para llaves superior y por cada

acción de la biela, la tubería recibirá un golpe con la herramienta.



FIGURA 18



FIGURA 19

TREPANO O HERRAMIENTA DE CORTE

FIGURA 20



PARA INICIAR

*Regular**Californio*

TREPANO. - Es la herramienta destinada a ejecutar la perforación y se considera la parte más importante de la sarta. Se compone de las siguientes partes: piñón, cuello, cuadrado para llaves, hombros, cuerpo, pasos de agua o canales de evacuación y filo cortante.



FIGURA 21



TREPANO CRUZ O ESTRELLA

De acuerdo con los materiales por atravesar se emplean varios tipos de trépanos: estandar, regular o california, de cruz, torcido, etc.

Estandar, regular o california, son los de uso más común ya que se emplean para cortar formaciones suaves o duras variando el tipo de afilado de acuerdo con las mismas.

Recibe el nombre de california cuando su diámetro es mayor de 203 mm (8") y regular o estandar cuando es menor.

TREPANO TIPO CRUZ O ESTRELLA FIGURA

21 .- Se usa para perforar formaciones fisuradas o inclinadas que tienden a desviar las herramientas de la vertical. El cuerpo

de este trépano tiene 4 pasos de agua y su diámetro es ligeramente menor que el del área de corte.

TREPANO TORCIDO. - Es un trépano california con cuerpo en forma de espiral; sus características le permiten producir un batido mayor y agujeros más derechos.

PROTECTOR DE CABLE FIGURA 22. - Es una herramienta complementaria; su forma se ajusta al cuello del portacable y tiene una sección de un cuarto de círculo por donde se desliza el cable; evita que éste se quiebre cuando las herramientas se levantan de la posición horizontal hasta la vertical o viceversa.



FIGURA 22

GUARDACABO FIGURA 23. - Cuando el cable se flexiona al extremo, se emplea el guardacabo para evitar que se quiebre.



FIGURA 23



PORTACABLE GIRATORIO FIGURA 24. - Tiene por objeto permitir que la sarta gire después de cada golpe. Es de sección cilíndrica, con una perforación concéntrica de diámetro tal, que permite el alojamiento de una bala o mandril que sirve de unión al cable de perforación con el resto de la sarta. En su extremo inferior tiene una caja para enroscar con el piñón de las tijeras de perforación. Cuenta

Fig. 24

además con varias perforaciones en su cuerpo para evitar atascamientos y facilitar la rotación.

CUCHARAS O CUBETAS Y BOMBAS ARENERAS. - FIGURAS
NUMEROS 25 y 26.

En los trabajos de perforación con equipo de percusión, el material triturado se extrae del pozo con una cuchara o cubeta. Están formadas por un tubo de lámina de acero de una sola pieza; en su parte superior lleva soldada o remachada un asa que se une al cable de la línea de cuchareo. Cuando es de válvula plana, en su extremo inferior tiene una válvula de charnela con movimiento de bisagra; que al ser sumergida en el material se abre dejando que éste penetre, para cerrarse al ser elevada. Cuando la válvula es de dardo, ésta se levanta al entrar en contacto con el fondo del pozo permitiendo el paso de los materiales cortados, cerrándose automáticamente al levantar la cuchara.

También existen cucharas denominadas bombas de arena o areneras que se usan para extraer o limpiar el pozo de arenas o gravas. Se emplean cuando estos materiales son abundantes y las cucharas propiamente dichas no dan resultado.

Están formadas por un tubo con una válvula de gozne en su extremo inferior y un émbolo que trabaja como pistón dentro del cuerpo del tubo al ser levantado, succionando los cortes. Para vaciarla se desconecta la válvula. Esta puede ser de Dardo para los desazolves simples y de Tipo Trepano, cuando la formación está muy compacta.

HERRAMIENTAS COMPLEMENTARIAS DE PERFORACION

BOMBAS ARENERAS

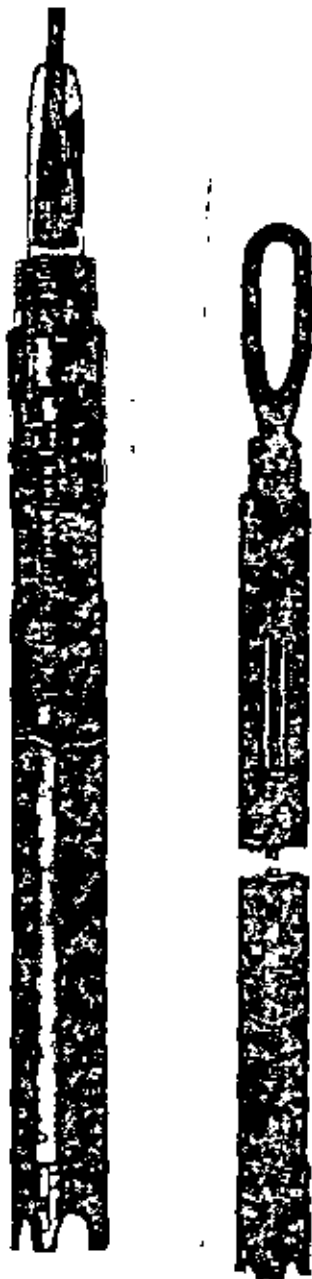


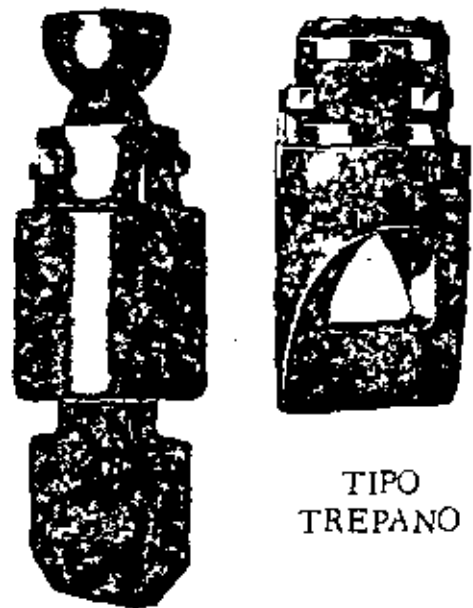
FIGURA 25

CUCHARA

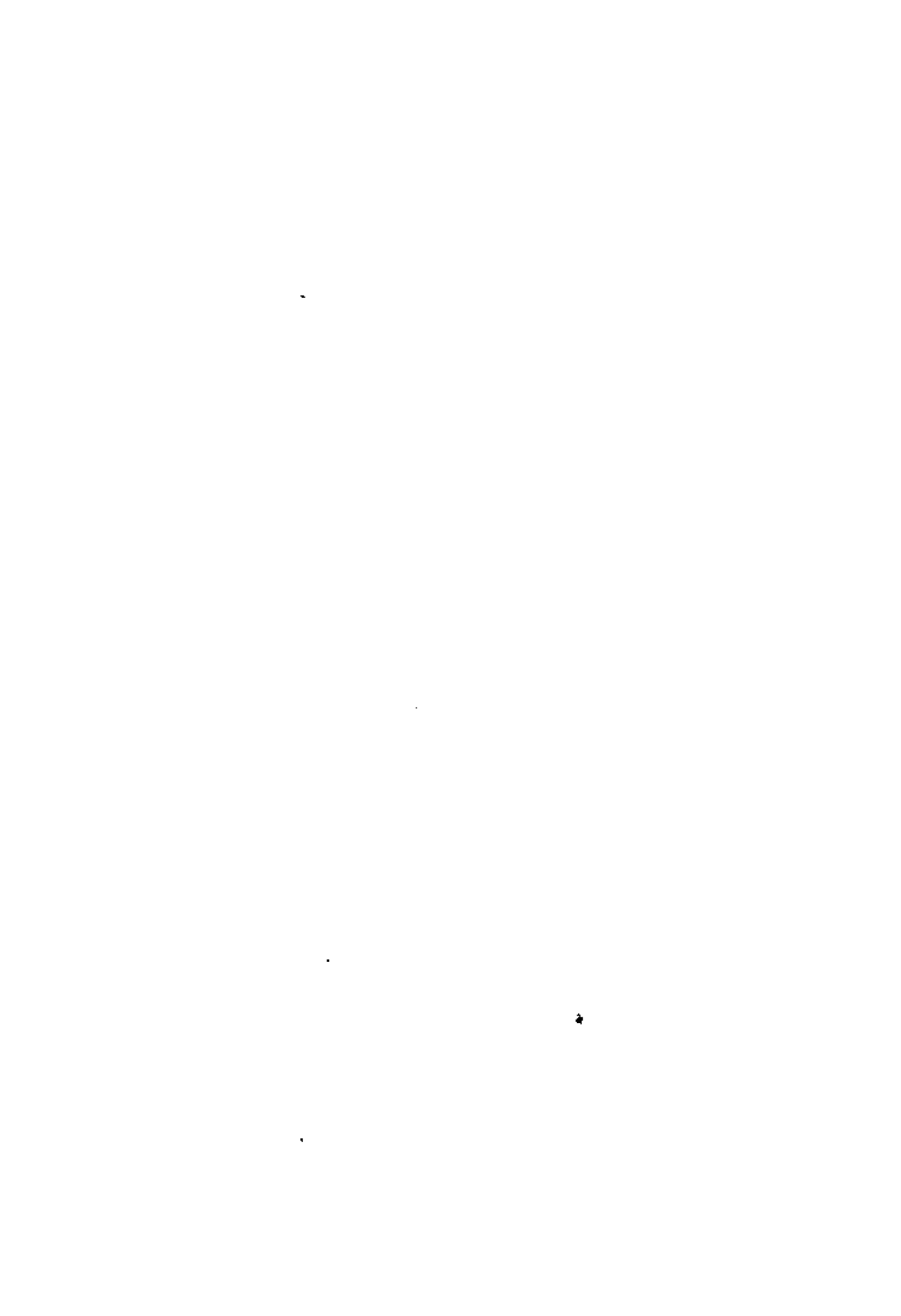


Fig. 26

VALVULAS

TIPO
TREPANO

DE DARDÓ



ESPATULA Y GANCHO DE PARED

ESPATULA



Fig. 27

GANCHO DE
PARED



Fig. 28

Además de las herramientas de perforación mencionadas, existen de fábrica, (sin contar con las llamadas "hechizas", es decir aquellas que los perforadores improvisan en el campo pero que dan muy buenos resultados) tantos como trabajos extraordinarios son necesarios realizar para llevar a feliz término la perforación de un pozo.

Entre ellos se pueden mencionar las espátulas y los ganchos de pared que se emplean para desbastar salientes del agujero, o bien para enderezarlo. Figuras



PESCAS. - También en la perforación de un pozo se presentan accidentes, tales como la caída o pérdida de herramienta dentro del agujero. A ésta se le nombra "pescado" y la acción de rescatarla, "pesca". Para llevar a cabo estos trabajos existen herramientas especiales, empezando por la sarta: el portacable no es giratorio sino fijo; el barretón es corto, de 3 m aproximadamente, la carrera de las tijeras es de mas o menos 3 veces las de perforación; y en lugar de llevar en el extre-

mo una herramienta de corte, aunque hay ocasiones que es necesario emplearla, se conecta un pescador.



PESCADOR
DE
RIENDILLAS
Fig. 29



PESCADOR
DE
CIRCULO
COMPLETO
Fig. 30



PESCADOR
DE
COMBINACION
Fig. 31



HERRAMIENTAS PARA PESCA

PARA CABLE



DE UNO O DOS
ARPONES

FIGURA 32

FIGURA 33
DE FRICCIÓN



CUERNO

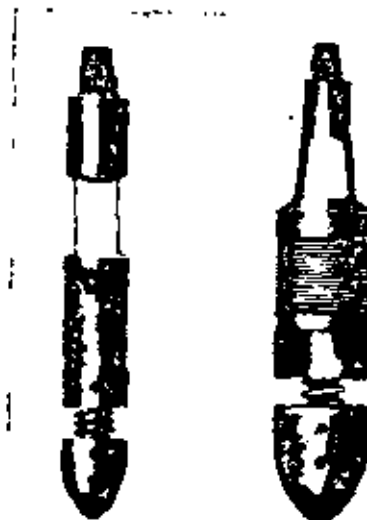
CORRUGADO

HERRAMIENTAS PARA PESCA



FIGURA 34

DE CUCHARAS



DE TUBERIA
FIGURA 35

TROMPO



TROMPO. - Hay ocasiones en que las tuberías de ademe se colapsan es decir cambian de forma por impactos producidos dentro del pozo. Para devolverles su forma original se utilizan los trompos.

FIGURA 36

UNION DEL CABLE A LA BALA O MANDRIL

Para evitar que el cable, que es quien soporta la sarta, se salga de la bala o mandril, los perforadores acostumbran seguir los pasos ilustrados en la figura inferior.



Se emplea como metal, el zinc o el babbít fundidos. Cuidando que tanto el cable y la bala estén perfectamente limpios para lograr una perfecta adherencia.



Para poder realizar con eficiencia y rapidez la perforación de un pozo, los operadores cuentan con varios trépanos de una sola medida previamente afilados, sustituyendolos a medida que se van desafilando; pero de -- tal manera que el diámetro del agujero sea el mismo, ya que cuando este -- se reduce al conectar un trépano con la medida correcta, tenderá a atorarse.

El trabajo de afilado inicialmente se realizó utilizando una forja, -- misma que en algunos casos formaba parte del equipo y el afilado se realizaba a base de golpes de marro.

Esta situación cambió al aparecer la soldadura autógena ya que el -- resultado fué el mismo con menor esfuerzo. A la fecha con el empleo de -- las soldaduras a base de carburo de tungsteno los resultados son los requeridos para llevar a cabo los trabajos a bajo costo.



BIBLIOGRAFIA

- Grown Water and Wells. E. Johnson.
- Water Well Drilling with cable. R. W. Gordon.
- Grown Water. Tolman.
- Mud Especifications. Baroid.
- Drilling and Fishing Tools. Bucyrus Erie Catalog.



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



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

PERFORACION A ROTACION CON AIRE

ING. ANDRES BENTON CUELLAR

OCTUBRE, 1980



PERFORACION A ROTACION CON AIRE

El proceso constructivo que se utiliza es practicamente el mismo que el de los sistemas rotatorios de circulación directa y el único cambio que se tiene es la utilización del aire como fluido de perforación.

El procedimiento con aire contempla la utilización de una torre de perforación con su rotaria, la sarta completa, llaves, cuñas y collarines para su manejo y por supuesto la broca adecuada.

En lugar de utilizar una bomba para el manejo de los lodos, debemos contar con compresor, mangueras con conexiones de alta presión y una bomba de pistones que nos permita incluirle agua-espumante al aire utilizada durante el proceso.



Método de Perforación.

La acción perforadora es debida a la rotación de una broca en el fondo del pozo, transmitida ésta por una sarta de perforación manejada desde la superficie por un kelly y una mesa rotaria o un cabezal de rotación todo sostenido a través de cables por los malacates o por sistemas de transmisión a base de cadenas o una combinación de ambos.

La broca al girar corta y desmenuza el material, conforme penetra en la formación, el fluido de perforación que se alimenta por el interior de la herramienta descarga a través de la broca golpeando el fondo del pozo limpiando de las partículas quebradas y ayudando en algunos casos a fracturar la roca, el fluido prosigue desplazándose hacia afuera por el espacio anular acercando los cortes a la superficie y mientras la tubería y la broca prosiguen su movimiento hacia abajo profundizando el pozo, el fluido descarga en la superficie, donde se separan los cortes.

Las funciones del aire como fluido de perforación son las siguientes:

- 1.- Lubricación de las herramientas
- 2.- Enfriamiento de la broca
- 3.- Limpieza del fondo del pozo
- 4.- Extracción de los cortes del barreno

Se puede observar que con el uso del aire se dejan de efectuar funciones que se consideran esenciales en la utilización de todos . Se pierden las ventajas relativas de prevención de derrumbes y control de presión de fluidos existentes en la formación, por lo que es evidente que no debe utilizarse en condiciones secas o fácilmente volátiles, es representativa una muestra con suficiente, solo es posible hacerlo en formaciones con un grado de saturación dependiente de su densidad.

La remoción de cortes de una determinada medida utilizando un fluido de baja densidad requiere de una velocidad de inyección media alta, es decir, la que se necesitaría con cualquier fluido que presente una mayor densidad, éste es el caso del aire, el incremento en la velocidad de inyección es considerable, el aire se inyecta a grandes velocidades y el efecto de remoción de partículas de tamaño se ve a las que se obtienen con los y en las formaciones más mayores, para lograrlo; las velocidades de inyección serán de 1000 a 1500 y tres mil pies por minuto, spaced así una primera inyección sobre un corte de todos que es la de tener el corte en la superficie, perfectamente en el momento de producirse.

La pérdida de la capacidad de soporte, nos obliga a una limpieza total del pozo antes de su pérdida la inyección del fluido, por lo que antes de cualquier parte no deberá circular hasta dejar de tener producción de corte en la superficie.

Por las velocidades tan altas que deben alcanzarse en el retorno, no es posible trabajar con este procedimiento en formaciones desmenuzables o fácilmente erosionables.

No continuemos con la capa de gel, que en el uso de lodos nos permite atravesar la formación atravesada, pero sin embargo el intercambio iónico con el uso de aire será prácticamente nulo, debido a la alta velocidad de circulación en el pozo.

En resumen, el aire como no proporciona la acción de soporte de las paredes puede ser utilizado únicamente en formaciones que se sostengan aún después de ser perforadas, no puede utilizarse en arenas, materiales de acarreo o sueltos, que no presenten determinada cementación.

Es muy importante hacer notar que es particularmente útil en lugares donde se tienen graves problemas de abastecimiento de agua o en formaciones que presentan pérdidas totales de circulación que obligan a un gasto excesivo de bentonita y agua, al tener la fuente del fluido de perforación en el sitio.

Presenta como una gran ventaja la de que, entre menor densidad y viscosidad presenta el fluido de perforación, se tiene una mayor velocidad de circulación mayor rapidez en la limpieza y por lo tanto un mayor rango de penetración de la formación, es decir, se perfora más rápidamente con aire que con

agua y mas rápidamente con agua que con todo; por lo anterior siempre que sea posible y aún en lugares donde existan pequeñas pérdidas de circulación, este método puede ser usado con ventaja, por el gran incremento en la velocidad de extracción del corte.

A poca profundidad puede utilizarse aire únicamente como fluido de perforación (mas o menos a veinticinco metros) pero al profundizar o encontrar materiales fracturados, se tienen dificultades en el acarreo de los cortes a la superficie y para facilitar la extracción de los materiales, se adiciona una mezcla de agua-espumante con una bomba que lo haga a una mayor presión que el compresor utilizado; obteniéndose así una columna que aunque presenta un peso específico muy bajo tiene una gran capacidad de "soporte" de las partículas, por la tensión superficial de la película de las burbujas formadas por el espumante.

El fluido aire-agua-espumante es una mejor solución para la extracción del corte, la lubricación y el enfriamiento de las herramientas de perforación en pozos profundos, que la simple utilización de aire.

B r o c a s .

Existen brocas especialmente diseñadas para la perforación con aire y como en todos los casos cada fabricante tiene una diferente nomenclatura para sus tipos de barrenas para utilizarlas de acuerdo al tipo de material de que se trate, en el caso de los martillos

de perforación generalmente son de insertos de carburo de tungsteno y construídas formando una sola pieza con el zanco, sobre el que golpea el pistón, pero también pueden ser utilizadas las brocas tricónicas conectadas a través de un zanco especial construído con ese objeto. Los fabricantes de brocas tricónicas no las garantizan en su uso para martillos por no estar construídas para este tipo de trabajo, pero pueden utilizarse adecuadamente teniendo la precaución de solicitar la broca para aire "air blast", en el caso de perforación de basaltos y otras rocas de muy alta dureza es conveniente una revisión periódica para poder detectar cualquier falla en los planos de contacto de los conos con toda oportunidad.

E s p u m a n t e s.

El espumante (perfoam) es un detergente sintético que tiene propiedades de producción de alta espuma y que se obtiene neutralizando un ácido con un alcali dando una sal soluble con la propiedad de hacer mas espuma que el jabón. Además, se le adicionan fosfatos solubles que tienen la función de reducir la dureza de los iones de Ca. y Mg., formando un complejo soluble en agua, ablandándola, lo que permite que se haga mas espuma, además con estos fosfatos se logra mejorar las condiciones de tensión superficial de la espuma.

Vienen envasados en tambores y aislados con bolsas impermeables para evitar su contacto con la atmósfera, puesto que se producen hon

gos en la superficie que dan mal olor cuando han estado almacenados por un tiempo largo, es necesario agitar nuevamente la solución pues suelen precipitarse algunas de las sustancias en solución, y en esta forma se obtiene la recuperación total de sus funciones.

Para incluirlo en el aire comprimido se utilizan bombas pequeñas de pistones y de alta presión, la que deberá ser mayor que la del aire comprimido usado, la línea de presión debe contar con su válvula check para evitar algún daño por inversión de la presión y además integrarse con los tanques donde se prepara y se alimenta el espumante.

Hay una gran variación en los porcentajes de mezcla, se preparan entre el 2 y el 6% del volumen de agua y el consumo llega a estar entre 5 y 20 lts por metro perforado, dependiendo de la importancia de las pérdidas de circulación y de la dificultad de perforación que presente la formación atravesada.

La mezcla agua-espumante varía de acuerdo a lo soluble de la formación atravesada y a los iones que contenga y en cada caso debe experimentarse en los primeros metros perforados hasta encontrar aquella que maneje los cortes del tamaño adecuado rápidamente.

En la práctica la cantidad adecuada de espumante que debe incluirse al aire es aquella que nos produce las menores pulsaciones en



la circulación, cuando la producción de espumante y corte que se observa a la salida del pozo es continuada y sin variaciones notables, podemos considerar que se tiene balanceada la mezcla.

En resumen, podemos decir que la perforación con aire es un procedimiento que debemos de utilizar cada vez mas, sobre todo en zonas áridas o en zonas con problemas específicos de perforación y en donde la formación geológica lo permita y para poder realizar programas masivos de perforación en acuíferos en rocas duras o compactas en el menor plazo posible.

Perforación con Martillo Neumático (Sistema Down The Hole)

Antecedentes.

La perforadora de roca fue probablemente la primera herramienta neumática. Originalmente fue diseñada para ser operada por vapor de agua, pero su aplicación en el tuneleo y la minería bajo la superficie forzó al uso de aire comprimido y consecuentemente al desarrollo de compresores. En 1861 se uso por primera vez en Europa la perforadora neumática para el tuneleo y en la construcción del primer túnel en los Estados Unidos en el año de 1866 se utilizaron perforadoras neumáticas. Desde entonces su uso ha hecho posible muchas cosas, industrias enteras dependen de la excavación de bancos de materiales rocosos o yacimientos mineralógicos, las vías ferreas,



carreteras y supercarreteras, han podido construirse con mayor facilidad, grandes presas y plantas hidroeléctricas, canales, tuneles, sistemas de abastecimiento y de drenaje y muchas otras obras, existen en la actualidad debido a las facilidades que ha otorgado el uso de esta herramienta tan importante.

La primera perforadora estaba conectada al final de un reciprocante que daba la acción pulsadora para quebrar la roca, y fue conocida como la perforadora de pistón. No fue perfeccionada sino hasta 1899, año en que se usó por primera vez la perforadora de percusión o martillo, en la actualidad los martillos están constituidos por un pistón colocado dentro de un cilindro que se mueve rápidamente hacia adelante y atrás, golpeando directamente en la tubería de perforación o en la broca, éste último método reproduce el diseño original y es el denominado "DOWN THE HOLE".





La perforación con esta herramienta es una variante de la perforación con aire pero presenta mayores ventajas, sobre todo en formaciones con tendencias a desviar la herramienta o de una dureza tan alta que prolongue demasiado los tiempos de penetración.

En la Fig. presentamos un corte de un tipo de martillo que puede manejar brocas tricónicas o de borón y existen en varias medidas desde 4 3/4" hasta 17 1/2" de diámetro, pudiendo perforar directamente en estos diámetros, sobre pedido ya se fabrican hasta de 30" como los usados en el caso particular del tendido del oleoducto en Alaska.

El Martillo Neumático "DOWN HOLE"

Este es el martillo más eficiente de todos, y el pistón golpea directamente sobre la broca y prácticamente la sigue dentro de la perforación.

La broca utilizada, generalmente es parte integral del martillo, pero sin embargo es posible la utilización de brocas tricónicas acopladas en lugar de las usuales de carburo de tungsteno.

El aire necesario es suministrado a través de la tubería de perforación y proporciona en este caso, la potencia y el fluido de limpieza del fondo del agujero para el acarreo y el aleje de las partículas corridas hacia la super

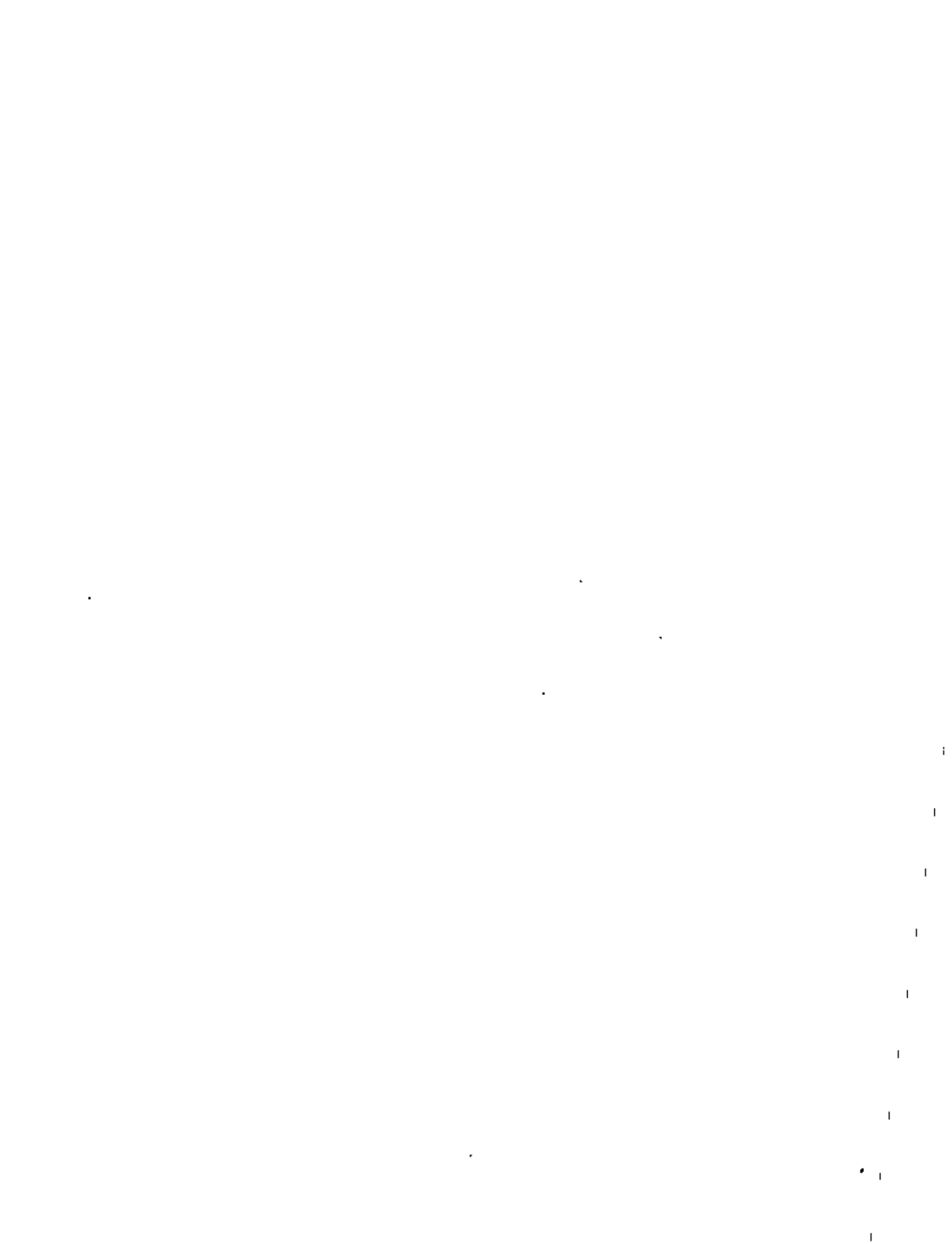


ficie. En barrenaciones de bancos para voladura de rocas se puede utilizar aire seco y será necesario contar con colectores de polvo en la superficie - con lo que se facilita el trabajo y se evita el deterioro del equipo de perforación, en el caso de perforaciones para exploración o construcción de pozos profundos, no es necesario utilizar el aditamento citado por ser obligado el uso de aire con agua-espumante.

La rotación necesaria para la operación, les es transmitida por la mesa rotaria o cabezal de rotación desde la superficie a través de la sarta de perforación.

Cuando se utiliza el martillo, se trabaja a bajas revoluciones de la rotaria - (entre 10 y 20 RPM) y se debe transmitir a través de la herramienta un peso que va únicamente de 1,000 a 3,000 lbs., no debiendo aplicar una carga mayor porque se impide su golpeteo. Lo anterior es una gran ventaja cuando se atraviesan formaciones que pueden dar lugar a desviaciones, porque la mejor práctica para evitarlas es la de aplicar poco peso a través de la columna de perforación. Debido al uso de poca velocidad en la rotaria y la aplicación de poco peso, es muy pequeño el esfuerzo que se transmite al equipo, aún cuando se perforen materiales de alta dureza, lo que repercute en un menor deterioro de éste.

El método exige la utilización de aire a una presión de cuando menos 250—



lbs/pulg² y solo podrá utilizarse un compresor de 100 lbs/pulg², usando martillos que operen a baja presión y solo en aquellos casos en los que el pozo al perforarse no proporcione agua. Con un compresor de 100 lbs/pulg² solo podrá llegarse al nivel freático, en algunos casos de pozos para procesos constructivos se puede utilizar el martillo; con suministro de aire a baja presión.

De acuerdo al diámetro de perforación se utilizan volúmenes de aire entre 450 y 2100 PCM resultando la velocidad de penetración en relación directa al volumen de aire utilizado que en el caso de los martillos influye no solo en la velocidad de extracción de los cortes sino en el número de golpes que transmite a la formación.

Con una buena operación y supervisión de los trabajos de perforación, podemos considerar que la realizada con martillo neumático es la más rápida, tratándose de formaciones compactas o duras, sin embargo obliga a la utilización de herramientas de alto valor y de maquinaria auxiliar como son los compresores y bombas de alta presión, así como al uso de espumantes adecuados, por lo que el método incrementa el rendimiento, pero también los costos de perforación en una forma notable, su mayor ventaja es por lo tanto la reducción del tiempo de construcción de un pozo y la posibilidad de construirlo lo más vertical posible.

Durante la perforación con martillo pueden encontrarse estratificaciones de



materiales sueltos, zonas en las que deberá repararse lo suficiente para que el material que esté fluyendo encuentre su ángulo de reposo y se compacte, también pueden encontrarse estratos de arcillas, en cuyo caso será necesario incrementar la rotación y aumentar la cantidad de espumante para mejorar la extracción del corte, en estos materiales es necesario que el perforista cuide, sobre todo el no encajarse por aplicación de peso excesivo, lo que provocaría que se embole la broca y se suspenda la circulación del aire, o sea atrapado por la formación.

El efecto del volumen de aire utilizado.

En el caso de perforación directa con broca tricónica, entre mayor volumen de aire se utilice, se tendrá una mayor velocidad de retorno y de transporte de los sólidos y se mantendrá más limpio el agujero, lo que nos permitirá un avance mayor por no tener que remoler los cortes, obteniendo además, un tamaño mayor de esquinla.

En el caso del martillo neumático a mayor volumen utilizado (con la presión adecuada para vencer la carga dentro del pozo) se tendrá un mayor número de golpes del martillo a la formación y consecuentemente una mayor velocidad de penetración además de la que se produce por la buena limpieza del fondo y el arrastre de partículas mayores.

El martillo, es un motor recíprocante y tiene una cámara donde admite y exp-

pulsa el aire proporcionando la energía necesaria al pistón, entre mayor sea el volumen de la cámara, mayor será la potencia del golpe transmitido y mayor será el avance en materiales que necesiten de este impacto para no caerlo fallar, en el caso de perforación de materiales un poco más suaves será conveniente utilizar el martillo con menor cámara de admisión porque dará un mayor número de golpes por minuto, aunque de menor impacto.

Es evidente que si utilizamos un compresor de determinado volumen para mover el martillo nos dará un número de golpes por minuto y si ponemos 2 compresores en paralelo, la velocidad de retorno se duplicará y así mismo para fines prácticos el número de golpes, así sucesivamente podrá ser incrementado en función del volumen de aire comprimido disponible. Lo ideal según gráficas americanas de perforación con aire es utilizar un agujero de 12 1/4" de ϕ cuando menos 1000 PCMA, para lograr el máximo rendimiento.

Deben considerarse esos datos solo como una guía de un trabajo ideal puesto que son datos de los realizados en las provincias petrolíferas norteamericanas y considerando condiciones de optimización, en la realidad, en la República Mexicana hemos perforado con volúmenes de aire menores a diámetros que no cabrían dentro de esas especificaciones.

Prácticamente hemos perforado a diámetros de 12 1/4" y a 17 1/2" de diámetro con volúmenes entre 1500 CFM y 2100 CFM, con la correspondiente reducción en los rendimientos de perforación, comparados con las normas americanas.

En forma por demás eficiente se realizan perforaciones exploratorias de 6 1/2" de diámetro y tubería de 3 1/2" con 450 PCM, lo que nos da una velocidad de retorno de 2750 piés/min., aún la perforación de 8 5/8" de diámetro con tubería de 4 1/2" nos dá 2540 piés/min. con 750 PCM y al perforar en 12 1/4" de ϕ con tubería de 5 1/2" de ϕ y 1500 PCM tenemos velocidades de retorno de 2300 piés/min., el rendimiento óptimo en este último caso se obtendrá al utilizar 2100 PCM con una velocidad de retorno de 3200 piés/min.

Presiones Necesarias.

Cuando se perfora directamente con broca tricónica y aire se necesitará una presión suficiente para vencer la carga piezométrica en el acuífero por atravesar mas las pérdidas de carga en el sistema, lo que nos permite perforar en algunos casos con compresores de baja presión, con las limitaciones que esto nos produce. Siempre es recomendable la utilización de compresores que nos den una presión adicional que nos permita resolver cualquier problema que se presente, que impida la circulación y pueda atrapar la herramienta.



Cuando se utiliza el martillo neumático deberá considerarse la presión de trabajo del mismo, adicional a la necesaria para circular el fluido en el sistema y a la carga producida por el agua que penetra al pozo.

En la práctica, las profundidades que se pueden alcanzar con la presión del aire disponible pueden verificarse fácilmente durante la perforación llevando una gráfica de presiones-profundidades con las lecturas en nuestros manómetros, por ejemplo; en el caso del uso del martillo, la presión inicial que nos marcará será la suma de las pérdidas de carga en el sistema, mas la presión de operación del martillo, conforme vamos profundizando van aumentando las pérdidas de carga y la pendiente que se observa es la causada por las pérdidas por conducción, la pendiente proseguirá hasta donde se manifieste el nivel piezométrico, que podrá mostrarse con un incremento violento de la presión de trabajo en nuestros manómetros y en forma evidente en el volumen de agua que retorna del pozo, esto en el caso de acuíferos confinados, o podrá observarse únicamente un cambio de pendiente que corresponde a la carga adicional producida por el agua que penetra el acuífero y el incremento del volumen de agua que retorna del pozo, en el caso de acuíferos libres.

Manejando en esta gráfica las pendientes que vamos obteniendo se puede pronosticar la profundidad a la que se puede llegar con las presiones disponibles en el compresor, lo anterior será evidente al reducirse bruscamente la velocidad de penetración de la formación y que en ocasiones es confundido -



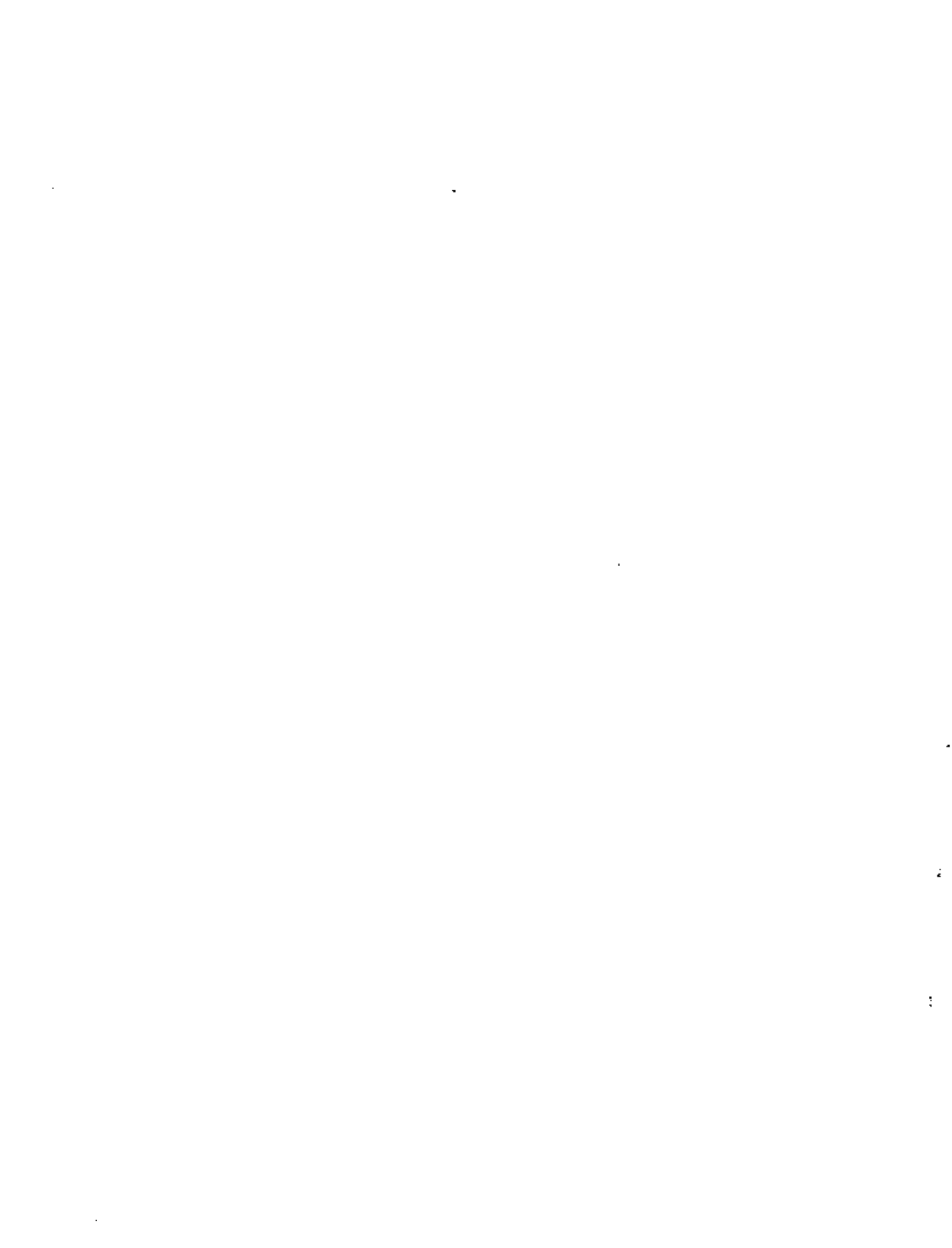
con problemas dentro del pozo.

Así podemos programar, hasta dónde llegaremos a perforar con el martillo, que generalmente alcanza las profundidades de diseño de las cámaras de bombeo.

Quando es necesario profundizar y no se cuenta con mayor presión, se deberá quitar el martillo y proseguir con broca tricónica y aire, puesto que dispondremos de la presión que se utilizaba para operar el martillo para proseguir el pozo, la nueva profundidad que podremos alcanzar es fácilmente programable, reduciendo en el último punto la presión utilizada por el martillo y llevando una paralela a nuestra última pendiente hasta llegar al límite de presión disponible, que corresponderá a la profundidad que puede programarse.

Quando disponemos de un "Booster" o multicompresor se integra al sistema y se podrán alcanzar mayores profundidades dependiendo de su capacidad.

Se puede observar la gran versatilidad que se obtiene con la combinación del sistema de perforación con martillo neumático y posteriormente con el uso de broca tricónica y aire. Con el martillo se logra perforar la parte correspondiente a la cámara de bombeo con la mayor verticalidad posible en esa zona, el ritmo de perforación tratándose de una misma formación es prácticam-



mente el mismo desde el inicio del pozo, a pesar de que no se puede aplicar el peso de lastrabarrenas, además se transmite el menor esfuerzo a la perforadora, logrando así que se tenga el menor deterioro posible del equipo. - Cuando ya no es posible utilizar el martillo ya se tiene la posibilidad de - - usar el peso de los lastrabarrenas para proseguir con buen ritmo de avance. Es necesario aclarar que aún utilizando martillos es indispensable el uso de lastrabarrenas, ya no para proporcionar peso sino para rigidizar la sarta e impedir la desviación de la perforación por la acción pendular al encontrar el martillo plano de contacto entre materiales duros y suaves.

Es recomendable diseñar el sistema compresor, perforadora, mangueras y conexiones con diámetros amplios y válvulas de seguridad adecuadas, así como con sus válvulas check horizontales para evitar contrapresiones que nos dañen el compresor. Se debe dar preferencia al uso de tubería de perforación de diámetro exterior grande (4 1/2", 5 1/2") y por lo mismo un diámetro interior grande que nos reduzca al mínimo las pérdidas de circulación. - Sobre el martillo deberá de colocarse (cuando no viene integrado al mismo) una válvula check que tiene la función primordial de evitar que se invierta - la circulación al interior de la tubería cuando se tenga un paro inesperado o cuando se hacen las conexiones, sin esta precaución se tapará la broca y el martillo se calzará con partículas de corte, lo que provoca algunas veces - hasta el atrapamiento de la herramienta y en el mejor de los casos tendrá - uno que sacar toda la sarta para desarmar y limpiar el martillo con la pérdida de tiempo correspondiente.

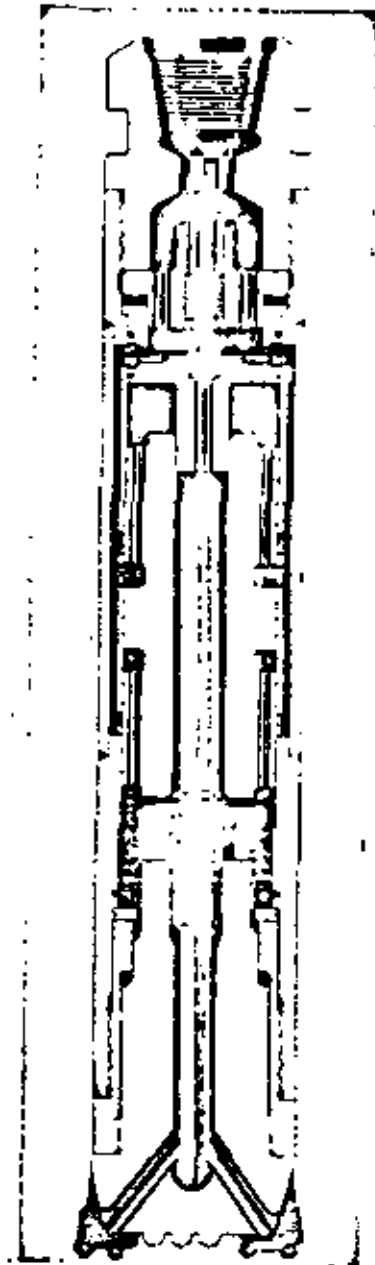


Para la correcta operación es indispensable una limpieza absoluta en la tubería y conexiones, por lo que se deberá sopletear perfectamente cada tubo antes de su conexión a la sarta, así mismo se debe contar con el sistema de lubricación de aceite que alimente en forma continua sarta y martillo.



TABLE D. TOTAL WEIGHT ON BIT

	400	1000
	600	1500
	900	2300
	1500	3600
	1900	4700
	5100	7600



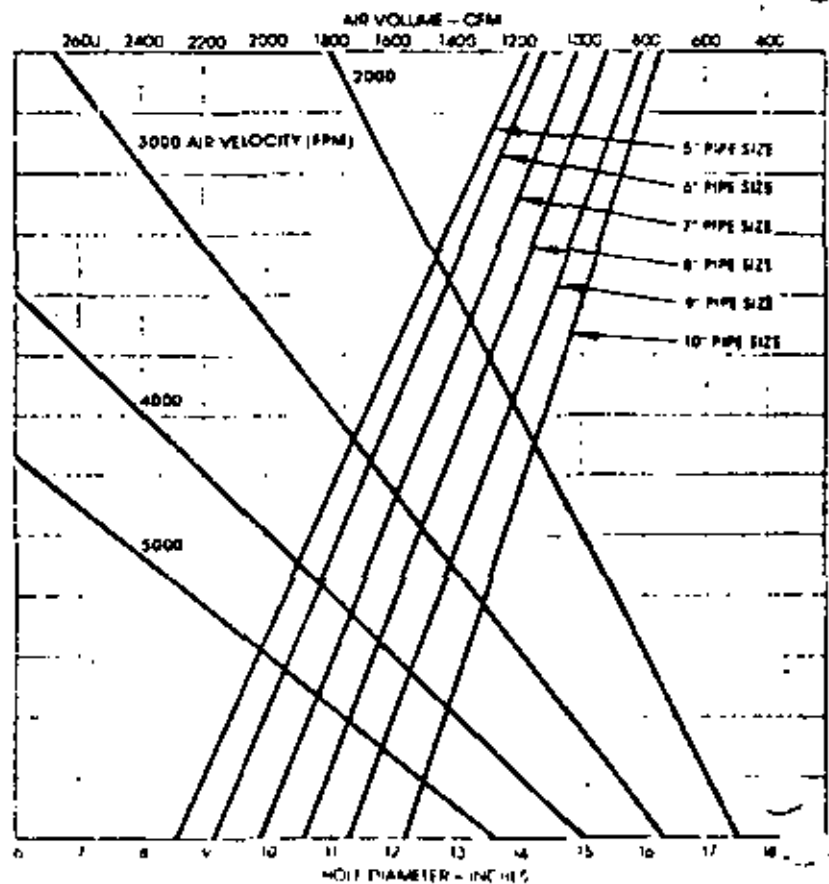
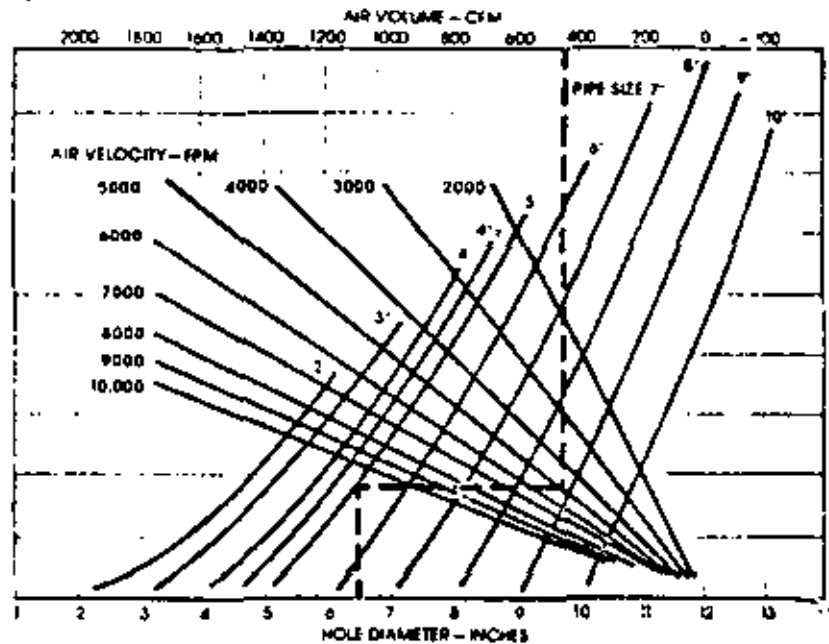
105	-	170	-	220	-	290	-	3	36-1/2	39-1/4	
140	-	205	-	260	-	330	-	3-17/32	41-3/4	45-3/8	
190	295	285	410	400	570	570	805	4-3/8	43-7/8	47-1/2	
365	510	460	660	620	885	760	1085	5-3/8	51	55-3/8	
180	325	300	500	430	695	565	890	5-7/16	46-5/16	51-5/16	
475	725	575	965	790	1260	1090	1670	6-3/8	55	60-3/16	
660	920	800	1160	NO RECOMENDADO ARRIBA DE 150 LPC				10	62-3/4	71	



To determine air velocity in annulus when pipe size, hole diameter and air volume are known, follow vertical Hole Diameter line upward to its intersection with Pipe Size line. Move horizontally to intersect Air Volume line. Read Air Velocity on diagonal Air Velocity line.

EXAMPLE: Drilling a 6½-inch hole using 5-inch drill pipe and with 450 cfm air volume passing through the annulus, follow the Hole Diameter line to Point A, its intersection with Pipe Size line. Move horizontally to Point B, to intersect Air Volume line. Read annulus Air Velocity at Point B (interpolating between 4000 and 5000 fpm) or 4700 fpm.

Figure 48. Air velocity determination chart



AIRE COMPRIMIDO

Definiciones:

Capacidad del Compresor.

Se refiere al flujo del aire o gas comprimido, entregado de acuerdo a las condiciones de temperatura, presión atmosférica y composición del aire a la entrada del compresor.

Desplazamiento del Compresor.

Es el volumen desplazado por unidad de tiempo y usualmente se expresa en pies cúbicos por minuto, por ejemplo. En un compresor recíproco, es igual al área del pistón multiplicado por el desplazamiento del mismo y por el número de emboladas por minuto.

En el caso de multicompresiones (booster) el dato que nos da el fabricante, corresponde al desplazamiento de los cilindros de baja presión únicamente, salvo una indicación contraria.

Compresión Adiabática.

Se considera compresión adiabática cuando no se agrega o se quita calor al gas durante el proceso de compresión. La ecuación característica que relaciona la presión y el volumen durante este proceso es:

$$PV^k = C$$

que es la relación entre el calor específico a una presión constante y el calor específico a un volumen constante.

COMPRESION ISOTERMAL

Se realiza cuando la temperatura del gas permanece constante durante la compresión. Para los gases perfectos su producto presión por volumen permanece constante y su proceso es reversible.

Relación de Compresión

Es la relación entre la presión absoluta de descarga y la presión absoluta de entrada.

Eficiencia de Compresión

Es la relación entre los HPs teóricos y los HPs agregados al aire o al gas que entrega el compresor.

La potencia agregada es la potencia al freno menos las pérdidas de carga en el sistema.

Eficiencia Isotermal

Es la relación entre el trabajo teórico calculado bajo una base isotermal y el trabajo agregado al gas durante la compresión.

Eficiencia Mecánica

Es la relación entre los HPs agregados al aire o gas y la potencia al freno.

Eficiencia Volumétrica

Eficiencia volumétrica, es la relación entre la capacidad del compresor y el desplazamiento del compresor, este término no se aplica a los compresores centrífugos.

AIRE LIBRE

Se define como aire libre aquel que se encuentra a las condiciones atmosféricas en cualquier lugar, se refiere a desplazamiento o capacidad.

Potencia al Freno

Es la potencia que recibe el compresor a través de la flecha.

Potencia Teórica

Son los HPs requeridos para comprimir el aire o el gas entregado por el compresor sin cambios de temperatura del mismo, a través de los rangos de presión especificados.

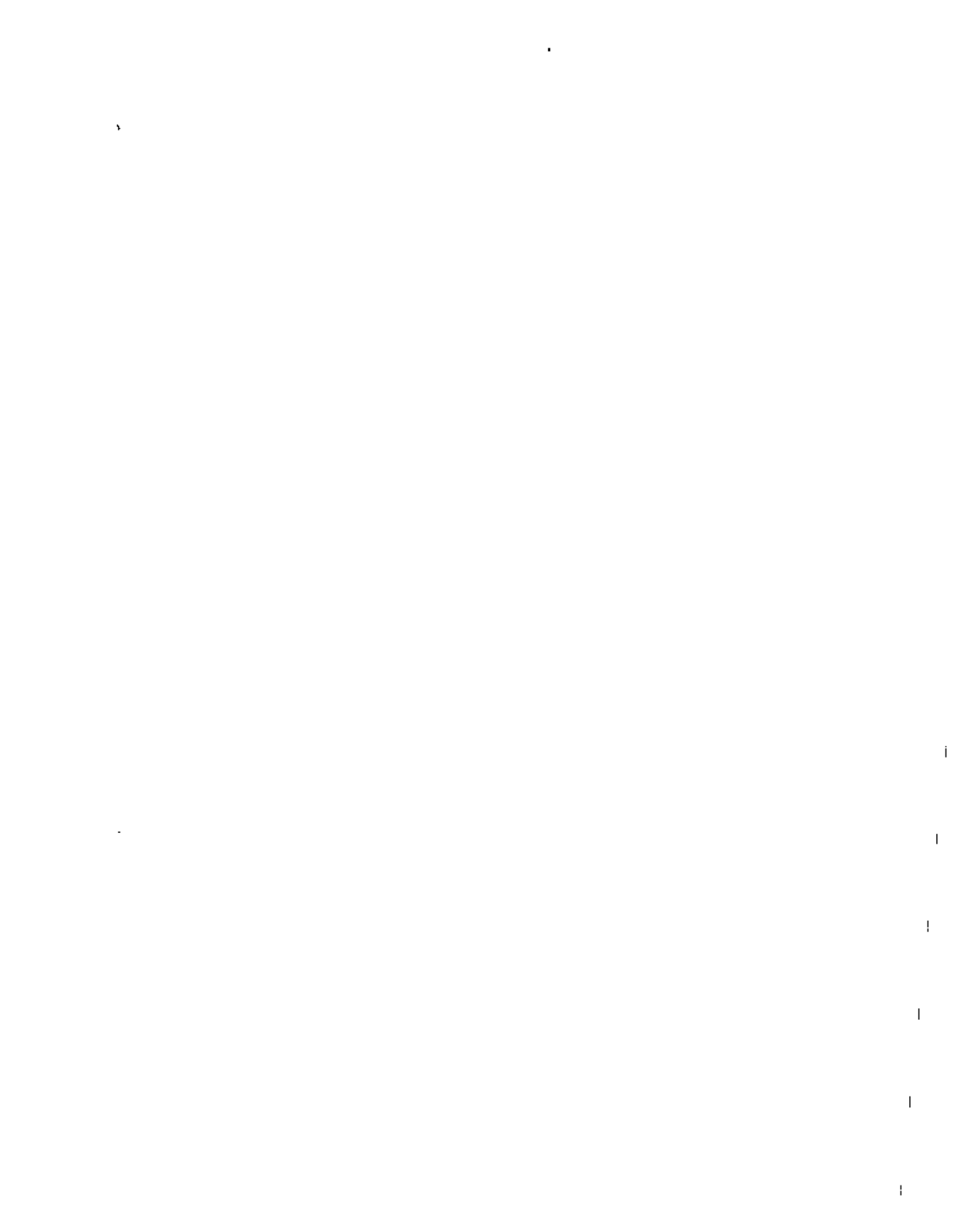
Humedad relativa

La humedad específica es el peso del vapor de agua en una mezcla de aire vapor, por unidad de aire seco.

Presión absoluta

Es la presión total medida desde el cero absoluto, desde el vacío absoluto

Es la suma de la presión barométrica y la presión medida.



PRESIÓN DE DESCARGA.

Es la presión absoluta total en la descarga del compresor, comúnmente se define como presión medida, pero a menos que se incluya la presión barométrica, no debe considerarse como "presión de descarga"

Gravedad Específica

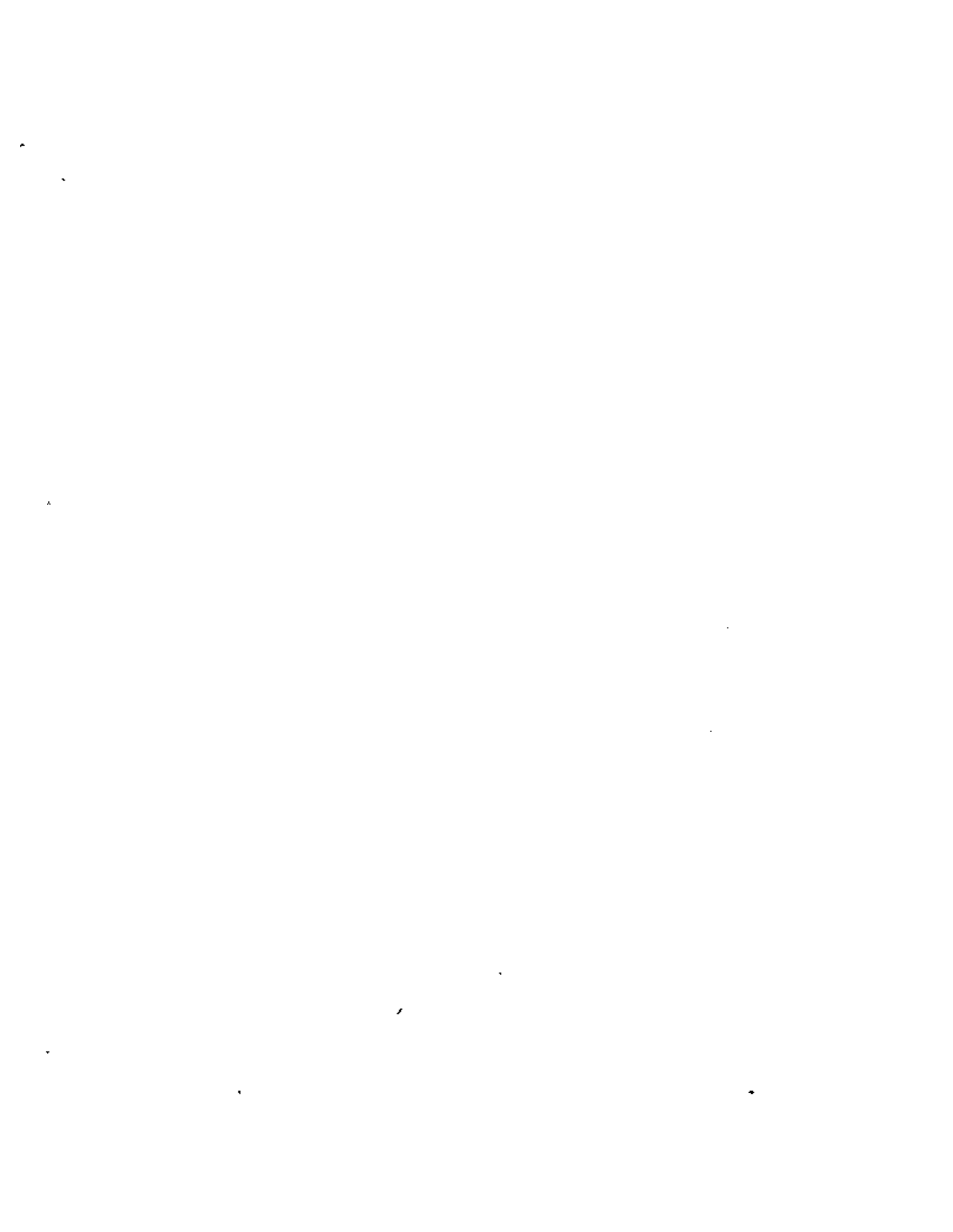
Es la relación entre el peso específico del aire o gas y el peso del gas seco a la temperatura y presión ambiente.

Peso Específico

Peso específico de un gas es el peso del aire por unidad de volumen y a menos que se especifique, se refiere al peso por unidad de volumen en las condiciones de temperatura, presión y composición que prevalece a la succión en el compresor.

Aire Standar

ASME se define como tal aquel que se encuentra a 68°F , 14.70 y humedad relativa de 3% (Densidad 0.0750) pero en la industria la temperatura del aire Std es de 60°F



FACTORES QUE SE DEBEN TOMAR EN CUENTA PARA LA SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA NEUMÁTICA

- 1.- **Peso de la Herramienta.** Una herramienta ligera es más fácilmente manejable.
- 2.- **Velocidad.** Entre mayor velocidad se imprima a la herramienta, más pronto se realiza el trabajo.
- 3.- **Potencia.** Con mayor potencia (cuando se necesita) se logra la estabilización de la velocidad a una carga determinada.
- 4.- **Medida.** Debe ser tal que pueda realizar el trabajo fácilmente.
- 5.- **Calidad.** Este es un factor muy importante a tomar en cuenta.
- 6.- **Uniformidad**
- 7.- **Mantenimiento. Costos**
- 8.- **Eficiencia Relativa.** La eficiencia de trabajo comparada con otros métodos para realizar el trabajo.

El escoger la herramienta adecuada hace posible a un operador realizar mejor su trabajo. El costo del uso de la herramienta misma más el costo del aire requerido es en ocasiones pequeño comparado con las consecuencias en el costo de una incorrecta selección del equipo.

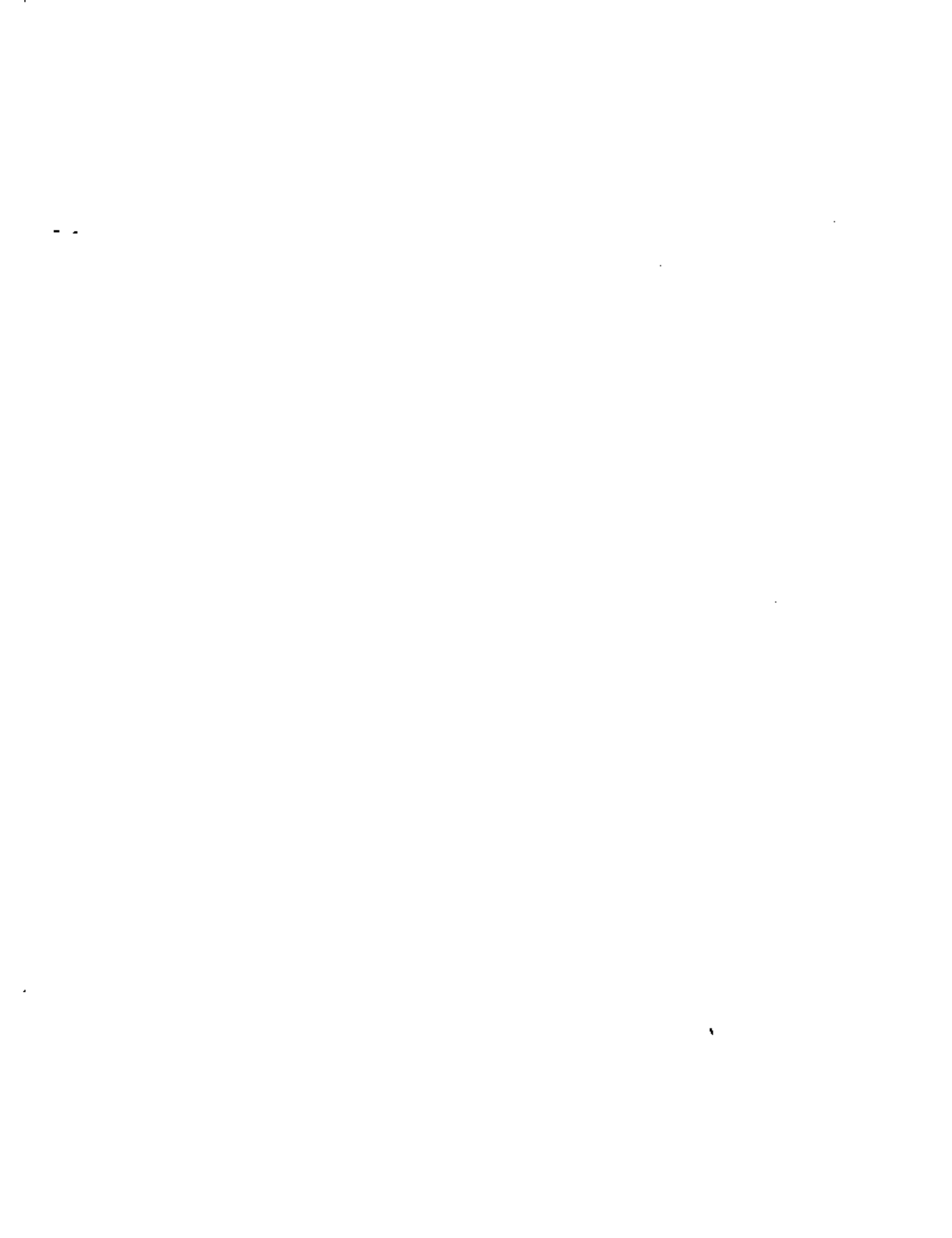
Adecuada Presión de Aire.



Coeficiente de Corrección por Altitud

Piés	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
Metros	0	305	610	915	1220	1526	1831	2136
Coeficiente	1.0	1.02	1.05	1.08	1.11	1.14	1.18	1.22

Piés	8000	9000	10000	12500	15000
Metros	2441	2746	3050	3813	4577
Coeficiente	1.26	1.30	1.34	1.46	1.58



COMPRESORES

Propósitos de la Compresión.

La compresión de un gas tiene como objetivo entregar gas a una presión mayor que la existente originalmente.

La compresión tiene varios propósitos como son:

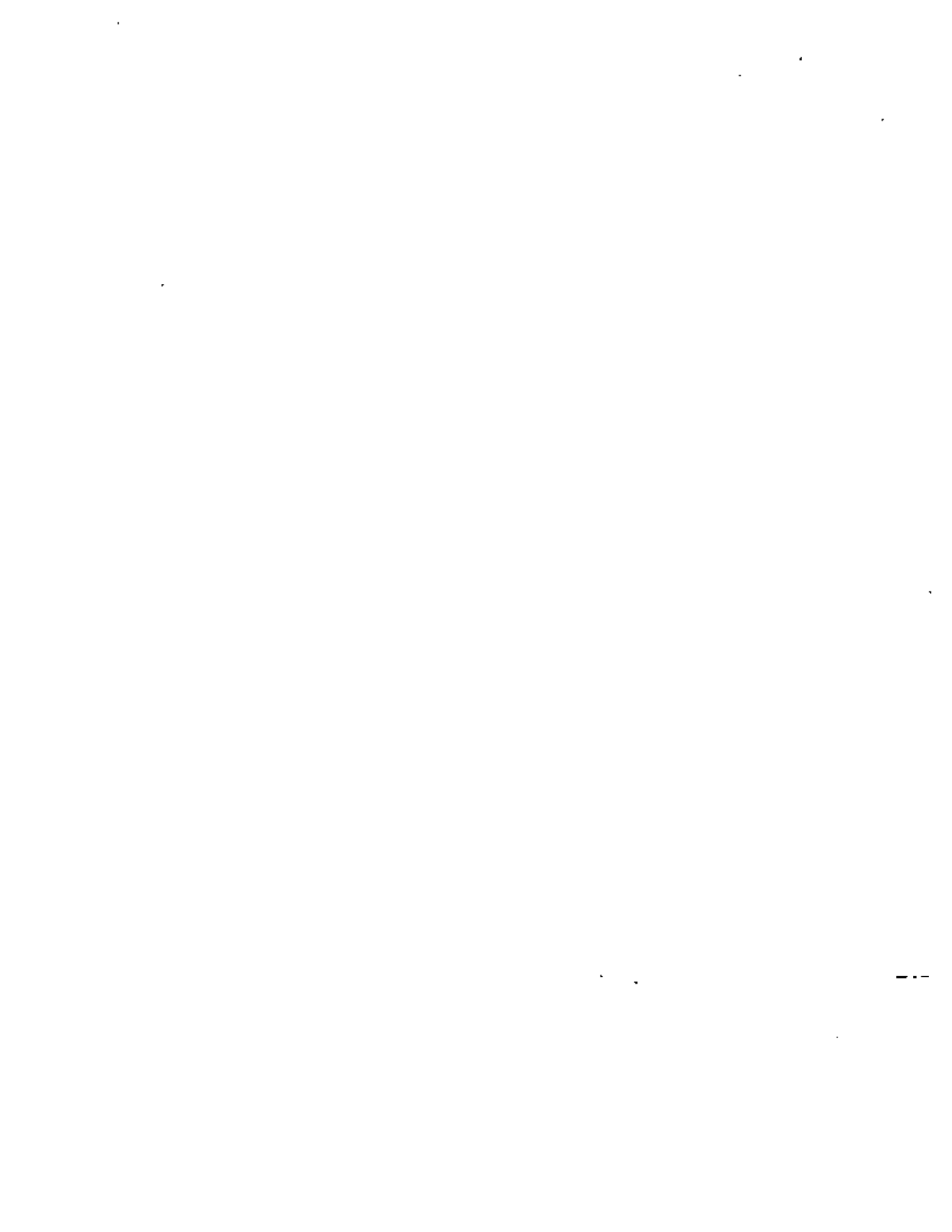
- 1.- Transmitir potencia
- 2.- Prover aire para combustión
- 3.- Transportar y distribuir gas
- 4.- Circular gases durante proceso
- 5.- Para acelerar reacciones químicas, etc.,

El más interesante en nuestro caso es el de transmitir potencia a través de un sistema de aire comprimido para mover herramientas neumáticas y de prover la potencia necesaria que dará velocidad al fluido de perforación.

Métodos de Compresión.

Existen 4 métodos para comprimir un gas.

Dos del tipo intermitente y dos de flujo continuo.



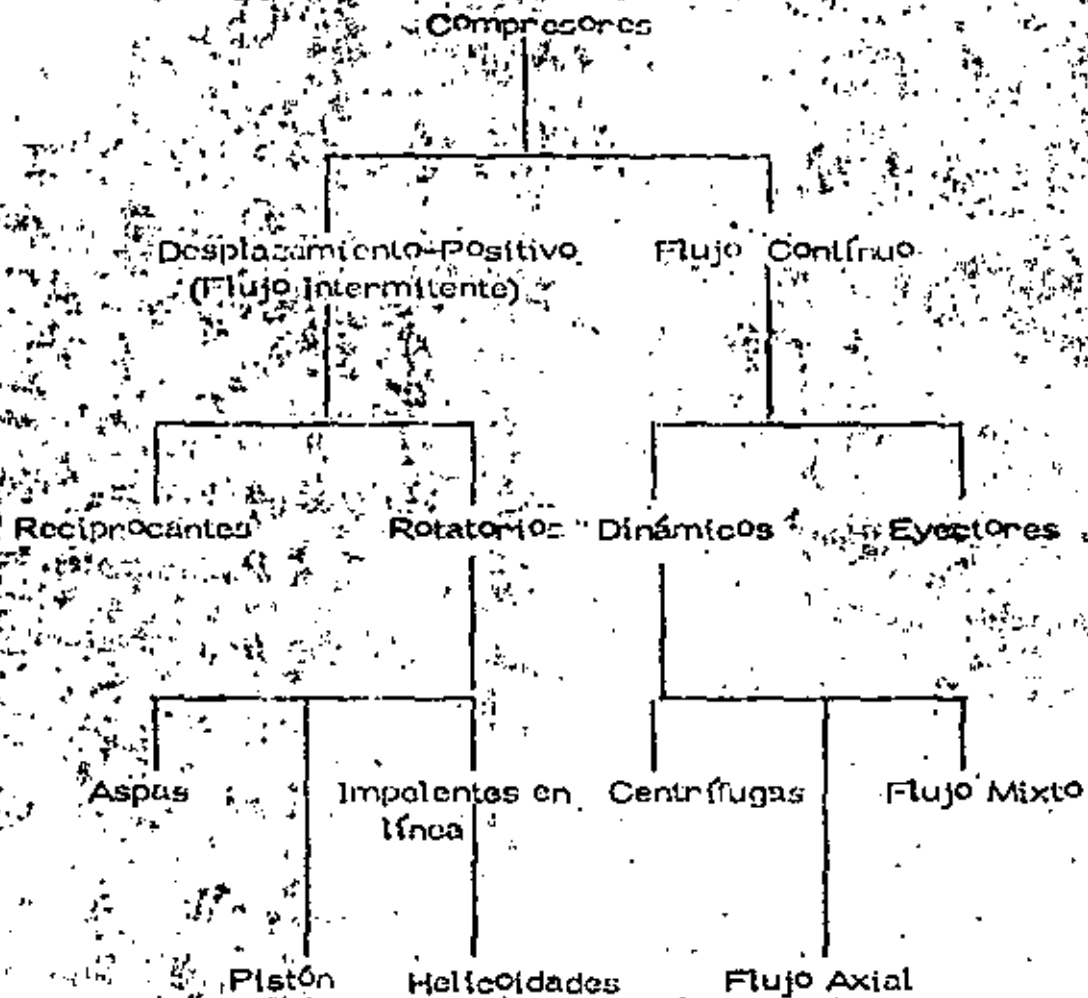
Estos métodos son:

- 1.- Confinar cantidades consecutivas de gas en un depósito, reducir el volumen aumentando la presión y expulsando luego el gas comprimido.
- 2.- Confinar cantidades consecutivas de gas en un determinado depósito, transportarlo sin cambio de volumen a la descarga y comprimir el gas al retornar desde el sistema de descarga y expulsar entonces el gas comprimido fuera del depósito.
- 3.- Comprimir el gas por la acción mecánica producida por la rotación a altas velocidades de impelentes o rotores de paletas que imparten velocidad y presión al gas que está circulando, la velocidad es posteriormente convertida en presión en los difusores fijos o paletas según el caso.
- 4.- Forzar la mezcla del gas al pasar por una espina de alta velocidad sobre el mismo o diferente tipo de gas (vapor de agua) y convertir la alta velocidad de la mezcla en presión en un difusor.

Los compresores que usan los métodos 1 y 2 son del tipo intermitente y son conocidos como compresores de desplazamiento positivo, los que utilizan el tercer método son conocidos como dinámicos y los que utilizan el cuarto método son conocidos como eyectores y normalmente operan con vacío en la succión.



TIPOS DE COMPRESORES.



Compresores de Desplazamiento Positivo. Son aquellas unidades que confinan volúmenes sucesivos de gas en un depósito y lo elevan a una - una mayor presión.

- 1) **Compresores Reciprocantes.** - El elemento de desplazamiento y - compresión es un pistón que tiene un movimiento recíprocante dentro de una camisa.



2) Rotatorios. - En este caso la compresión y desplazamiento es producido por la acción positiva de elementos a rotación.

2a) De Aspas. - En los que las espas radiales se desplazan en un rotor excéntrico montado en un cuerpo cilíndrico. El gas atrapado entre las espas al rotor, es comprimido y desplazado.

2b) De Pistón. - Aquí se utiliza un líquido como el pistón para comprimir y desplazar el gas manejado.

3b) Impelentes en línea. Dos impelentes de forma tabular confinan gas y lo acarrearán desde la entrada hasta la descarga. No hay compresión interna.

4b) Helicoidales. - Dos rotores interconstruidos cada uno con forma helicoidal comprimen y desplazan el gas.

Compresores Dinámicos. Son máquinas rotatorias de flujo continuo en el que la rápida rotación de los elementos acelera el gas, convirtiendo la carga de velocidad en presión, parte en los elementos de rotación y parte en los difusores estacionarios o paletas.

a) Centrifugas. - La aceleración del gas es provocada por uno o más elementos rotatorios usualmente curvados en los extremos, -



el coeficiente es radial.

b) Axiales.- En este caso la aceleración es obtenida por la acción de rotores de aspas (paletas) redondeadas en los extremos, el flujo principal es axial.

e) De tipo mixto. Los impelentes tiene una forma combinada de ambos tipos axial y centrífugo.

Eyectores.- Son artefactos que mezclan el gas al paso en una cámara de alta velocidad, convirtiéndose posteriormente la velocidad de la mezcla en presión en un difusor.

PERFORACION A ROTACION INVERSA

Los principios en que se basa este método son los mismos que los del método directo y los propios de los flujos que se utilizan para la perforación en general.

Con este procedimiento podemos utilizar como fluido agua, lodo o una combinación de estos con aire conforme sea necesario de acuerdo a la formación que se vaya a perforar.

El método como su nombre lo indica consiste en una inversión del flujo y tendremos así que el lodo es alimentado directamente de las fosas al pozo y el retorno se hace a través del interior de la tubería para lo cual es necesario utilizar una bomba de vacío para iniciar la circulación y una bomba centrífuga de alto gasto para realizar este trabajo.

Con el sistema se tiene la gran ventaja de que el área de retorno es bastante pequeña comparada con la perforación, por lo que la velocidad de retorno es mayor y consecuentemente de acarreo de los cortes y la limpieza mejor y más rápida.

Este procedimiento permite trabajar con la mayor eficiencia en cuanto a la hidráulica del pozo y esto nos permitirá acarrear partículas mucho --



mayores de cortes y prácticamente el tamaño de gravas o cortes acarreados estará limitado al diámetro interior de la tubería y por los quiebres que -- obligadamente damos en la parte correspondiente al swivel.

Otra característica adecuada es que se disminuye la erosión de las pare -- des y el arrastre de partículas del pozo y que además, el aumento del área por caídos y derrumbes no disminuirá nuestra velocidad de retorno por lo -- que se seguirán acarreado los cortes con la misma eficiencia, además se cuenta con la ventaja de poder usar lodos de baja densidad, teniendo así -- muy limpias las paredes del pozo.

Por las características citadas anteriormente, este procedimiento es muy adecuado para atravesar aluviones o materiales totalmente sueltos y la -- única desventaja es la de que como se perfora directamente a diámetros -- grandes se tienen torque que se genera es alto; lo que obliga a velocidades bajas de rotación, además como no es posible agregarle peso desde un -- principio, su operación es lenta en los inicios del pozo, hasta que se cuenta con peso suficiente para atravesar la formación.

Cuando se produce la diferencia de niveles por pérdida de circulación se -- tiene el problema de que el vacío producido por la bomba ya no es suficien -- te para producir el efecto de sifón y además cuando la profundidad se va -- incrementando lo van haciendo las pérdidas de carga por el retorno del -- fluido mezclado con el corte y que es bastante alto, lo que nos dá como re

sultado que no pueda utilizarse este procedimiento a mucha profundidad.

Cuando ya no se puede perforar por las cargas que se tienen que vencer, - se recurre a la inyección de aire para formar una columna de baja densidad en el interior del varillaje de perforación, la que tenderá a equilibrarse con el nivel existente en el pozo, por lo que se eleva hasta alcanzar el cabezal de la tubería de perforación pudiendo ya descargar iniciándose - así nuevamente la circulación y perforación. La velocidad de retorno en este caso es mayor por la mayor baja densidad de la columna que incluye el aire, la profundidad que se puede alcanzar dependerá de la sumergencia que se tenga y llegará un momento en que la presión de aire no podrá vencer la carga producida por la columna, por lo que siempre estaremos limitados a este equilibrio.

Con el uso de compresores de alta presión actualmente es posible alcanzar profundidades bajo el nivel estático que variaron entre 50 y 125 mts. bajo éste, dependiendo también de la productividad del acuífero atravesado.

Para incluir el aire en la tubería de perforación se utilizan dos tubos exteriores con sus empaques y conexiones integradas a los tubos de perforación o doble tubería concéntrica que nos permite incluir aire a través del anillo que se forma y retorna por el interior de la tubería de perforación.

Actualmente se han desarrollado dos sistemas del tipo anterior llamados Duo-Tube y Con-Core que presentan la ventaja de poder añadir pero que nos permite perforar rápidamente las formaciones duras.

Este procedimiento es muy efectivo particularmente en zonas donde el abatimiento de agua es problemático y además se presenten grandes pérdidas de circulación en la formación

VOLUME
REQUIREMENTS

for
AIR & GAS
DRILLING

By R. R. Angel

*Drilling Engineering Division
Production Department
Phillips Petroleum Company*

ACKNOWLEDGMENT

The author wishes to express his appreciation to the management of Phillips Petroleum Company for permission to publish this material.



Published by
GULF PUBLISHING COMPANY
Houston, Texas

CONTENTS

Hole Size in Inches	Pipe OD in Inches	Air 1.0	.8 Gas Gravity	.6 Gas Gravity
17½	6½	p. 1	p. 31	p. 61
	5½	p. 2	p. 32	p. 62
	4½	p. 3	p. 33	p. 63
15	6½	p. 4	p. 34	p. 64
	5½	p. 5	p. 35	p. 65
	4½	p. 6	p. 36	p. 66
12¼	6½	p. 7	p. 37	p. 67
	5½	p. 8	p. 38	p. 68
	4½	p. 9	p. 39	p. 69
11	6½	p. 10	p. 40	p. 70
	5½	p. 11	p. 41	p. 71
	4½	p. 12	p. 42	p. 72
9¾	5½	p. 13	p. 43	p. 73
	5	p. 14	p. 44	p. 74
	4½	p. 15	p. 45	p. 75
9	5	p. 16	p. 46	p. 76
	4½	p. 17	p. 47	p. 77
	3½	p. 18	p. 48	p. 78
8¾	5	p. 19	p. 49	p. 79
	4½	p. 20	p. 50	p. 80
	3½	p. 21	p. 51	p. 81
7¾	4½	p. 22	p. 52	p. 82
	3½	p. 23	p. 53	p. 83
7¼	3½	p. 24	p. 54	p. 84
6¾	3½	p. 25	p. 55	p. 85
6¼	3½	p. 26	p. 56	p. 86
	2¾	p. 27	p. 57	p. 87
4¾	2¾	p. 28	p. 58	p. 88
	2¼	p. 29	p. 59	p. 89

FOREWORD

This book presents the circulation rates that are required for air and gas drilling. These rates are the minimum necessary to produce velocities in the bottom of the annulus that are equivalent in lifting power to a standard air velocity of 3000 feet per minute. This standard air velocity is required for best results in drilling dry formations.

Each curve gives the air or gas requirements in standard cubic feet per minute versus depth for a particular drilling rate. Data for gas gravities of 1.0 (air), 0.8 and 0.6 are included. Circulation rates for intermediate gravities can be found by interpolation.

Each curve is a plot of solutions to the following equation:

$$\frac{6.61 S(T_s + G h) Q^2}{(D_o^2 - D_i^2)^2 V_s} = \sqrt{(P_s + b T_s) e^{2a/T_s} - b T_s}$$

$$\text{Where: } a = \frac{S Q + 28.8 K D_o^2}{53.3 Q}$$

$$b = \frac{1.625 \times 10^{-4} Q^2}{(D_o - D_i)^{1.25} (D_o^2 - D_i^2)^2}$$

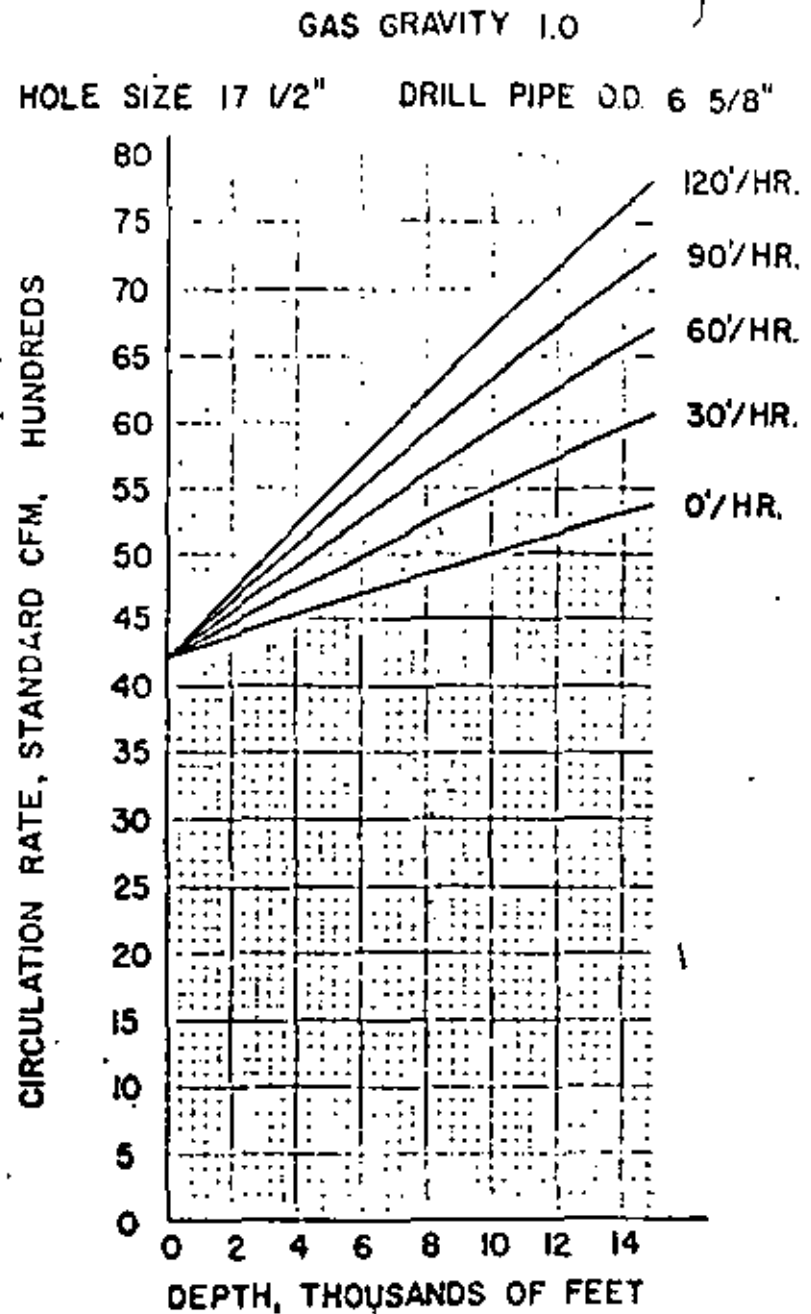
- D_i = Hole diameter, Ft.
- D_o = Pipe outside diameter, Ft.
- e = Base of natural logarithm, 2.71828
- G = Annular temperature gradient, °R/Ft.
- h = Depth, Ft.
- K = Drilling rate, Ft./Hr.
- P_s = Pressure in the annulus at the surface, #/Ft.² Abs.
- Q = Required circulation rate, standard Ft.³/Min. (60°F and 14.7 psia)
- S = Specific gravity of the gas related to air, dimensionless
- T_s = Surface temperature in the annulus, °R
- T_a = Average down hole temperature in the annulus, °R
- V_s = Velocity of standard density air, Ft./Min.

This equation includes the effect of the drilled solids on down hole pressures and velocities. It was derived by applying the Weymouth friction factor to vertical flow. This derivation was presented in the author's paper 873-G, "Volume Requirements for Air or Gas Drilling" at the annual fall meeting of AIME in Dallas, Texas, on October 8, 1957.

The solutions that are presented in this book were obtained on a digital computer. The use of this computer saved about six months of slide rule calculating.

VOLUME REQUIREMENTS
FOR AIR & GAS DRILLING

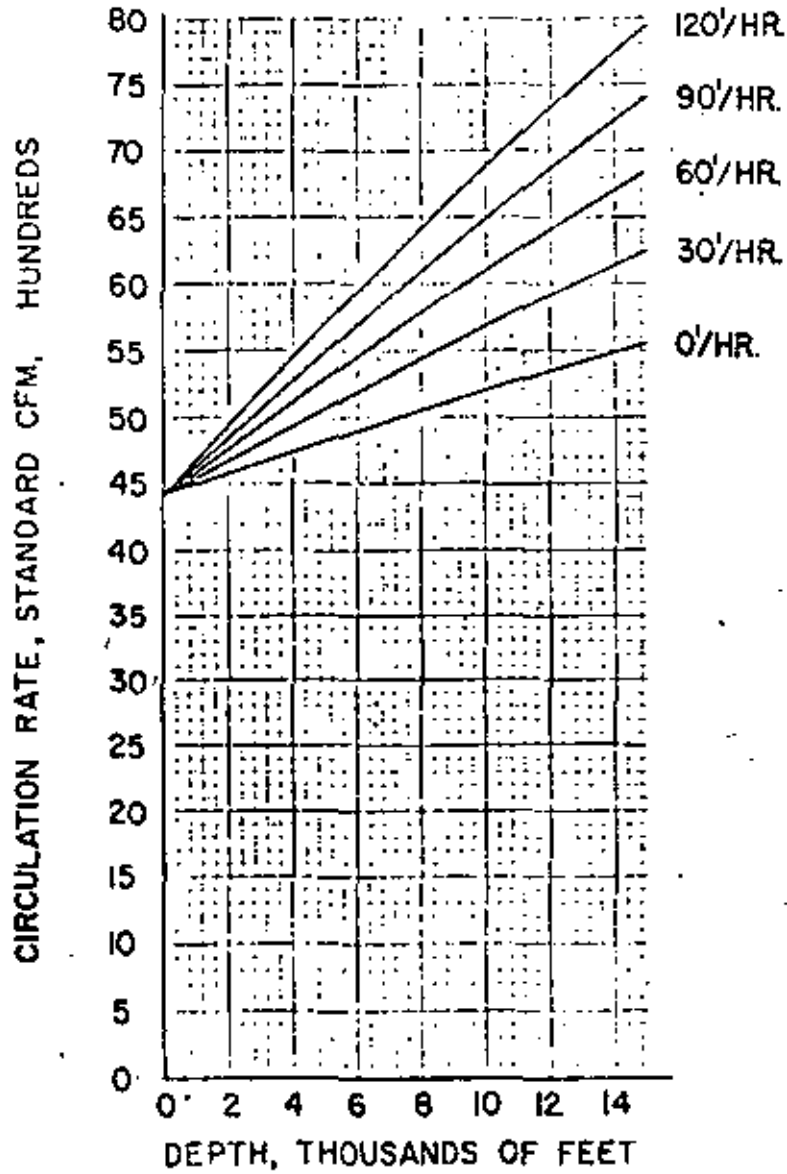
Copyright © 1958, by The Gulf Publishing Company.
Printed in the United States of America. All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form without permission of the publishers.



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 17 1/2"

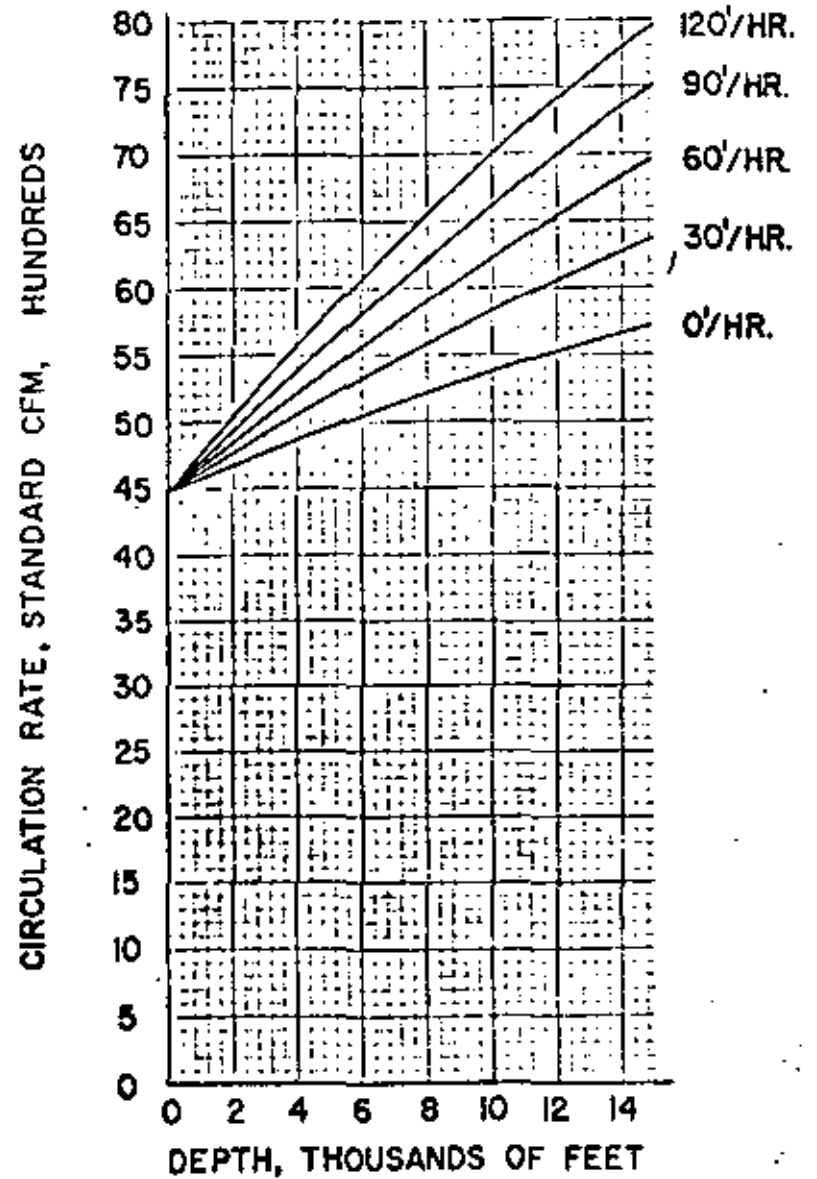
DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 17 1/2"

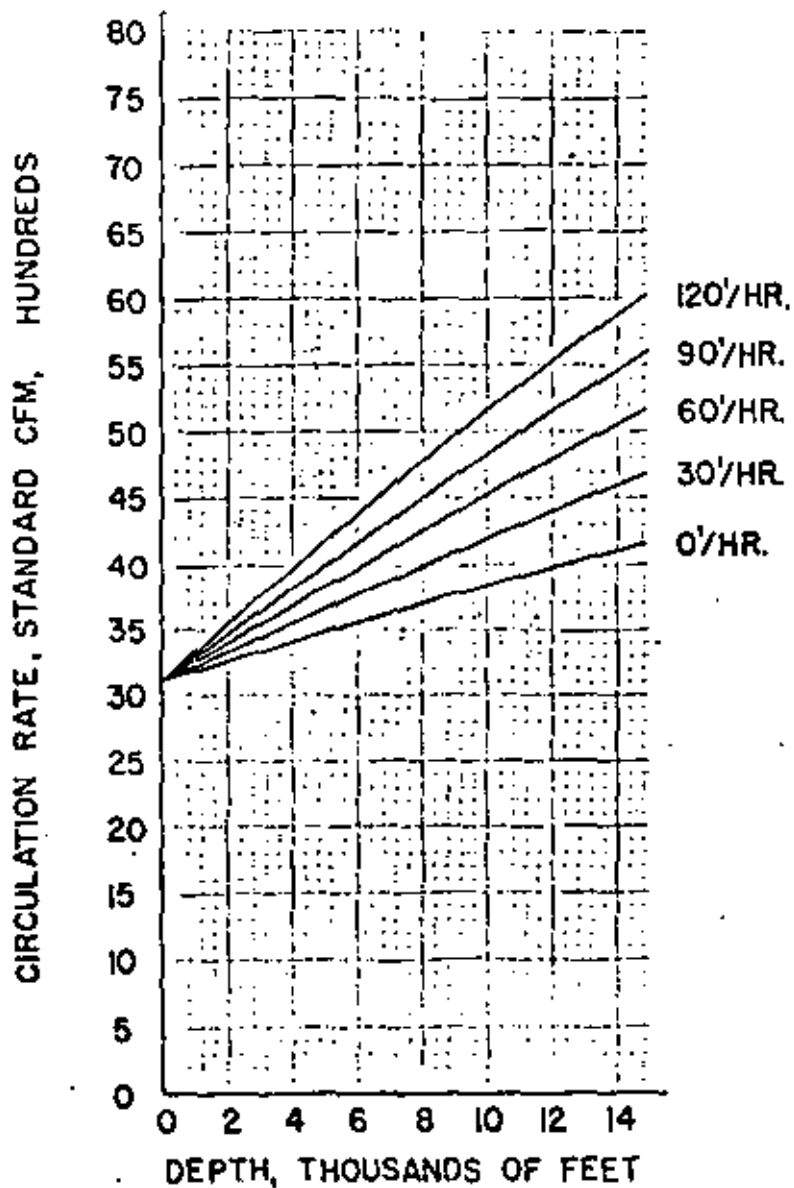
DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 15"

DRILL PIPE OD. 5 1/2"

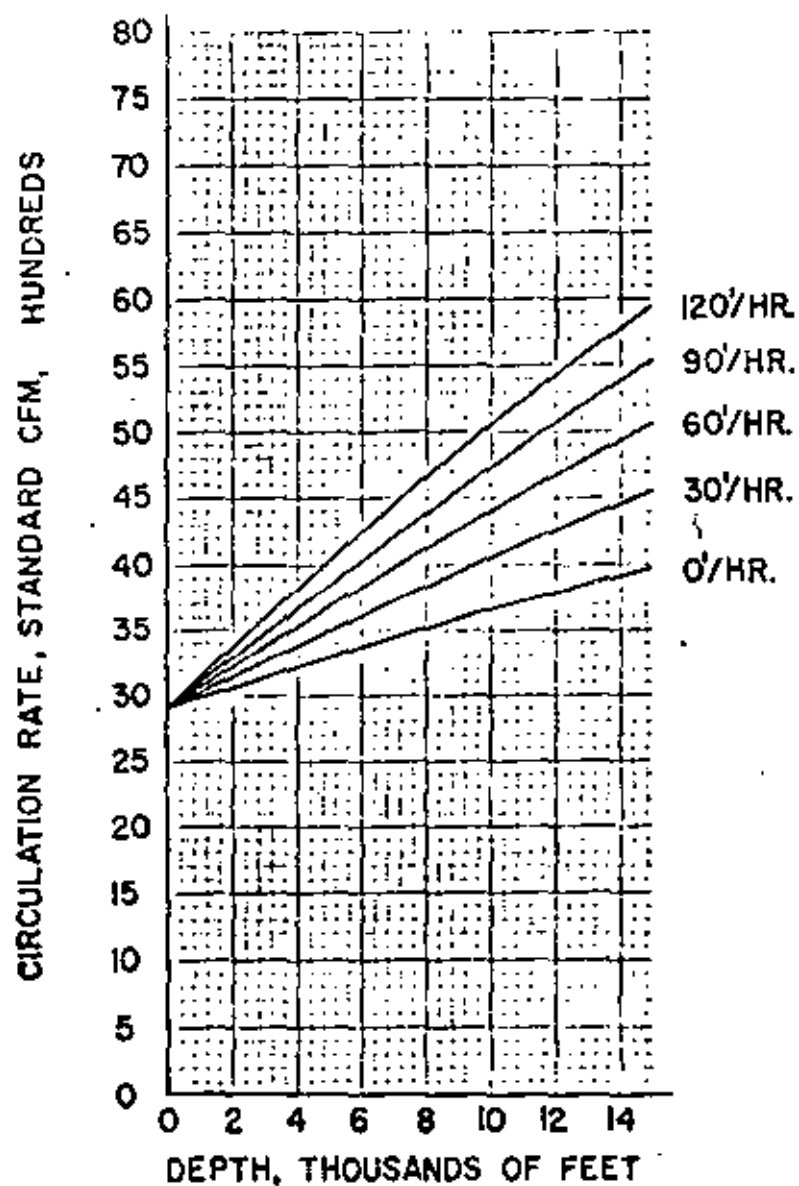


VOLUME REQUIREMENTS

GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 15"

DRILL PIPE OD. 6 5/8"



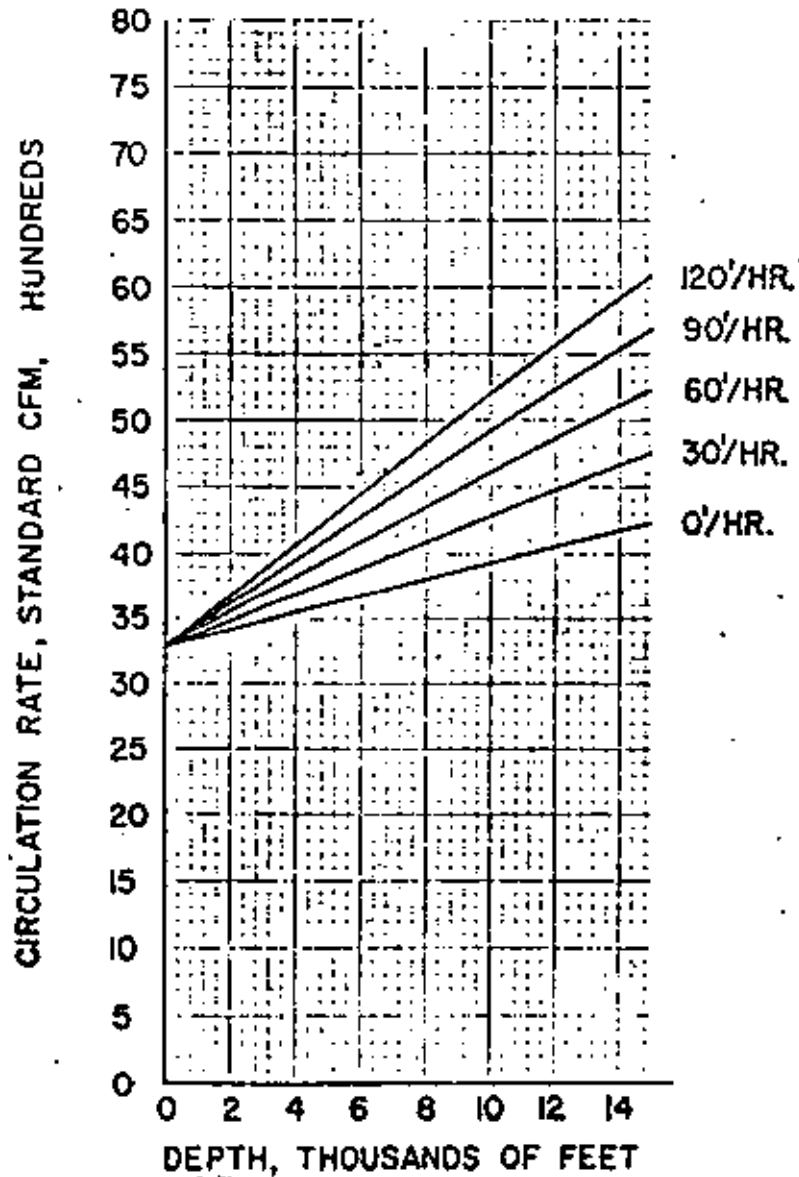
4 - VOLUME REQUIREMENTS



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 15"

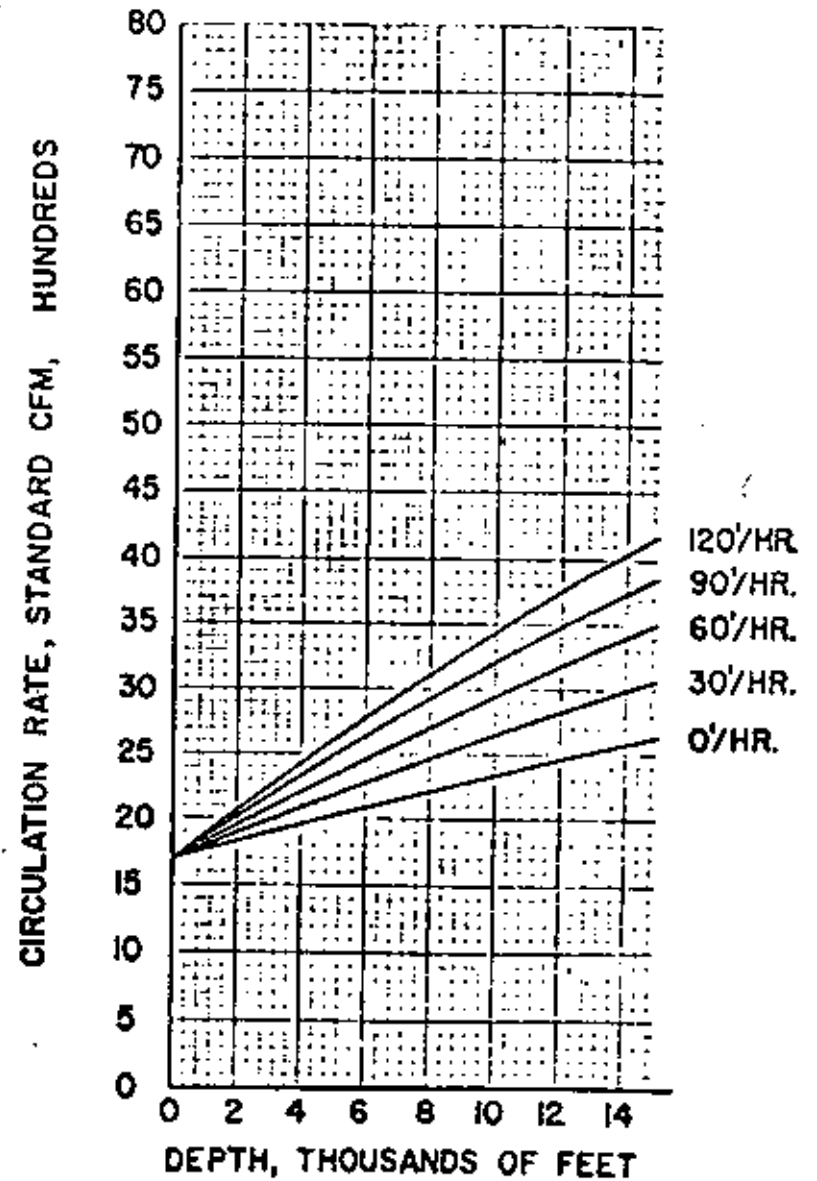
DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 12 1/4"

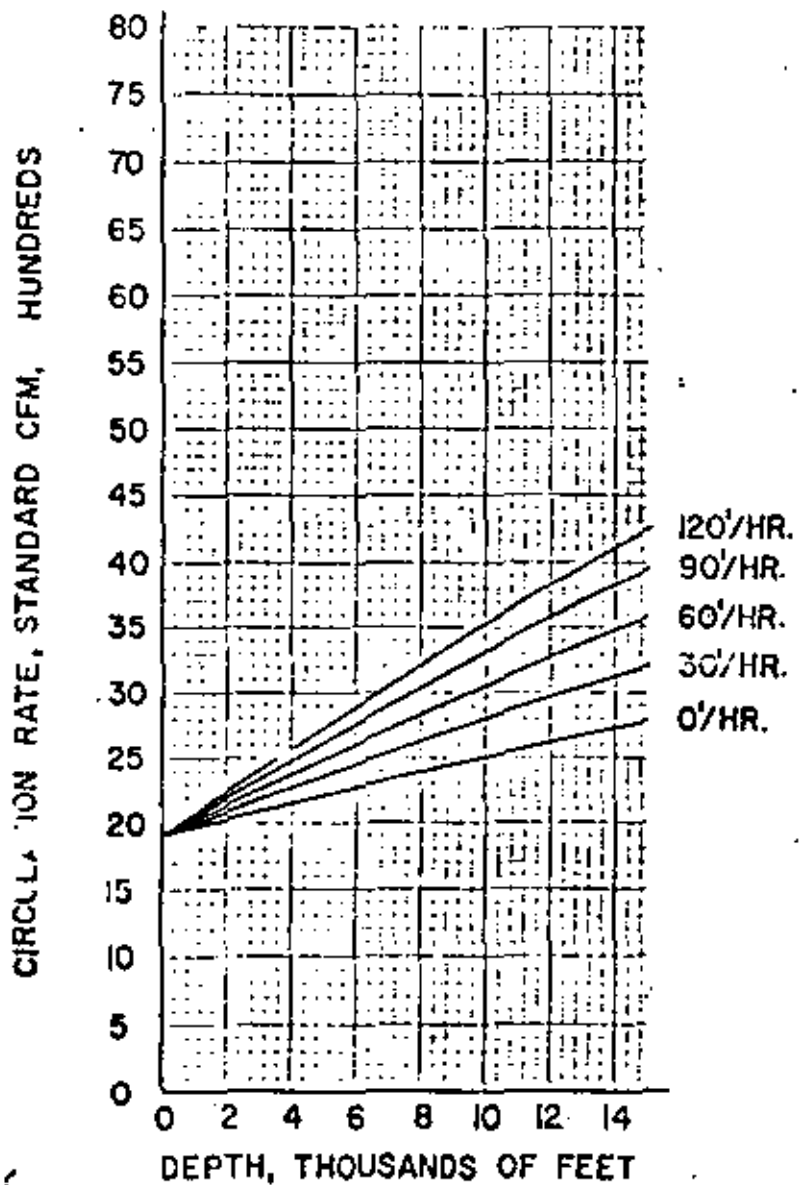
DRILL PIPE O.D. 6 5/8"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 12 1/4"

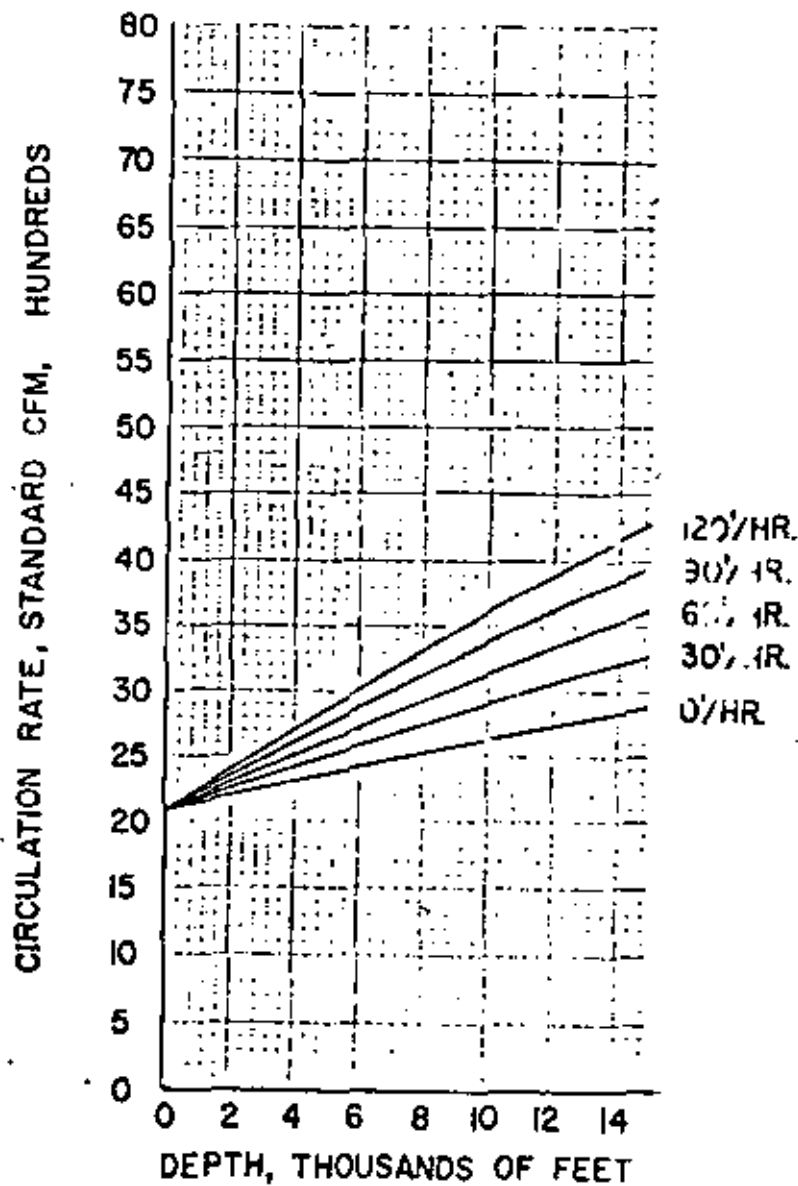
DRILL PIPE O.D. 5 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 12 1/4"

DRILL PIPE O.D. 4 1/2"

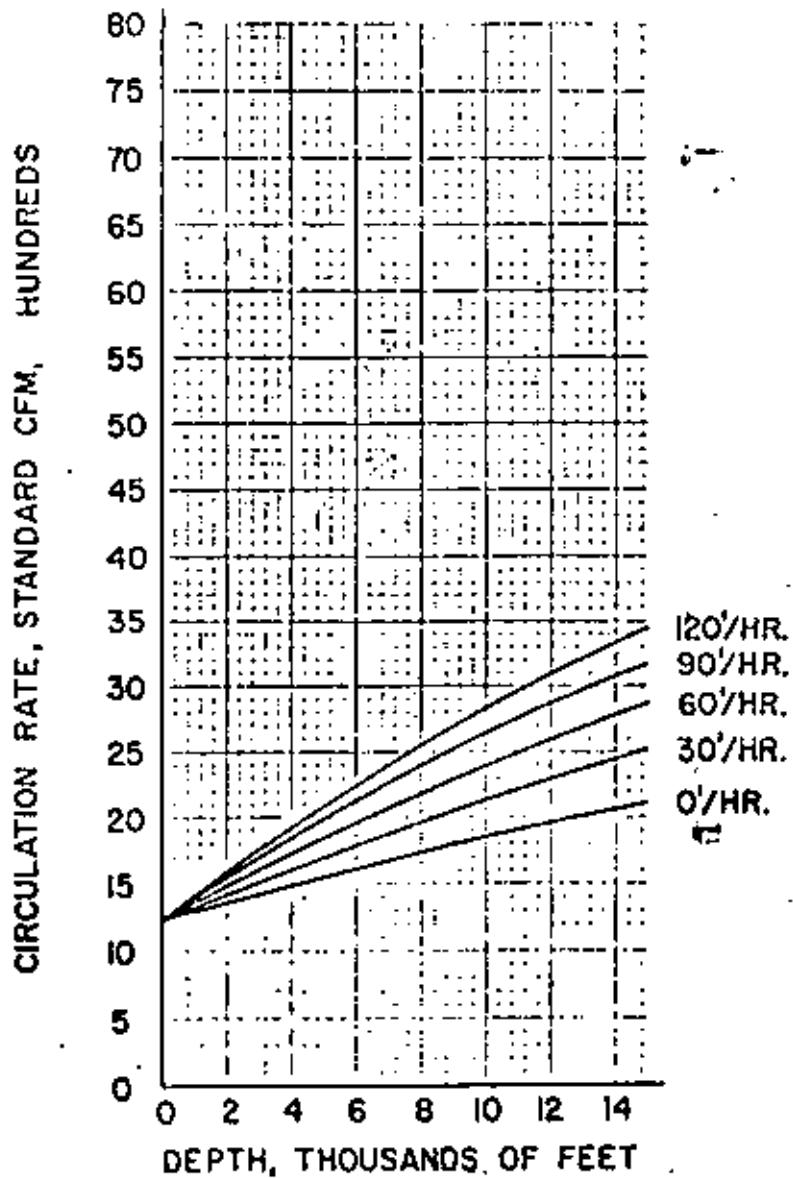




GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 11"

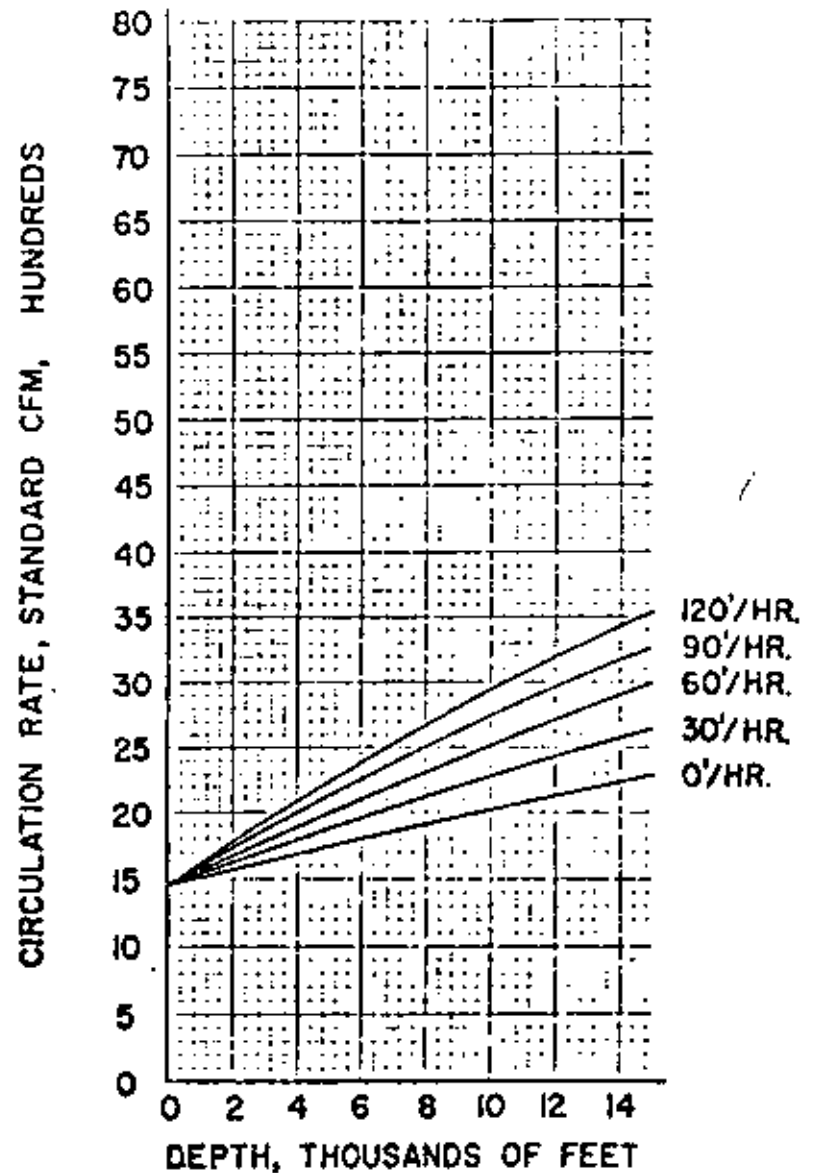
DRILL PIPE OD. 6 5/8"

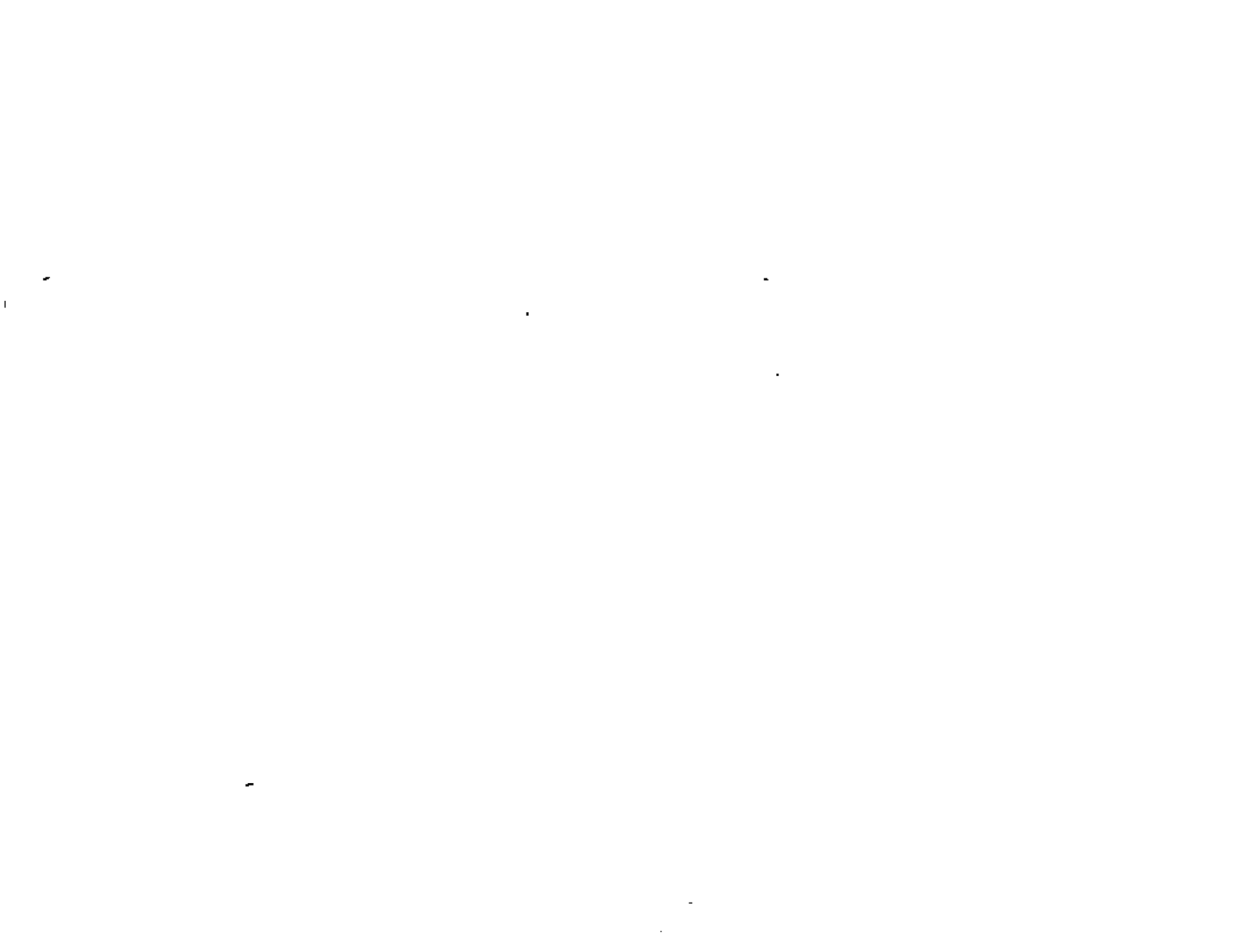


GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 11"

DRILL PIPE OD. 5 1/2"

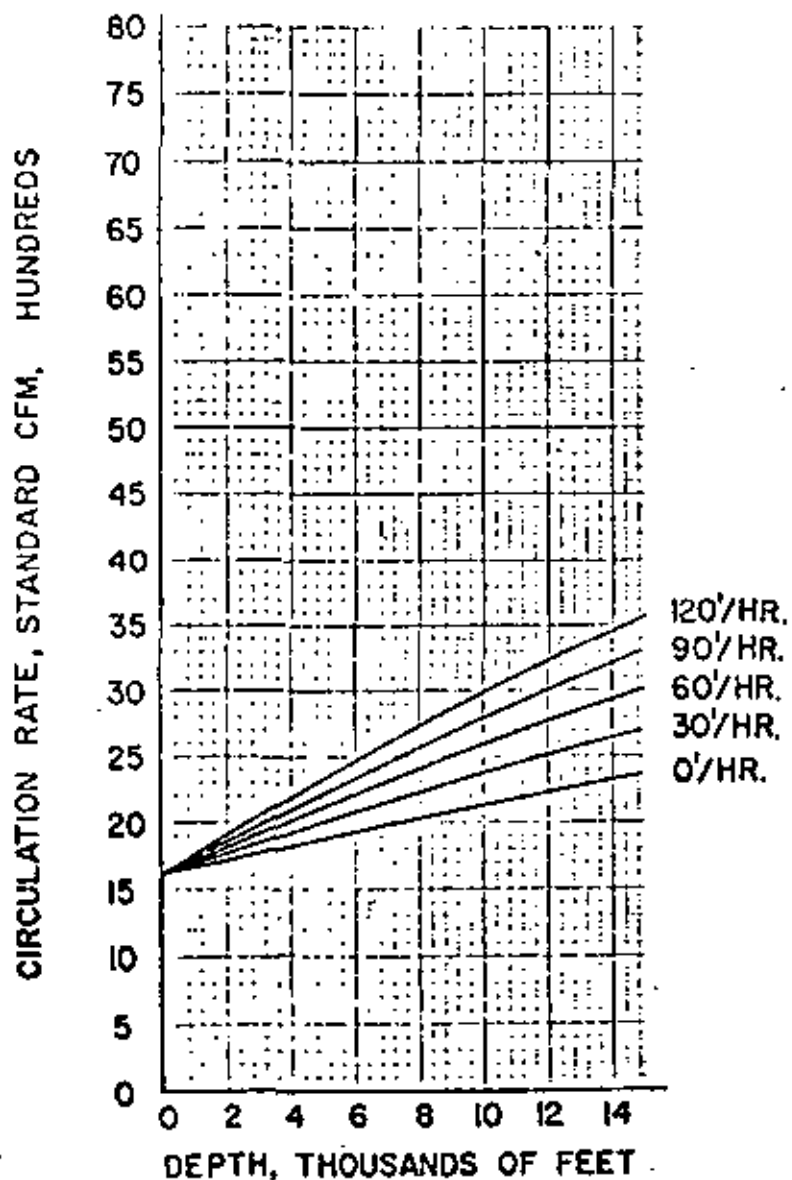




GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 11"

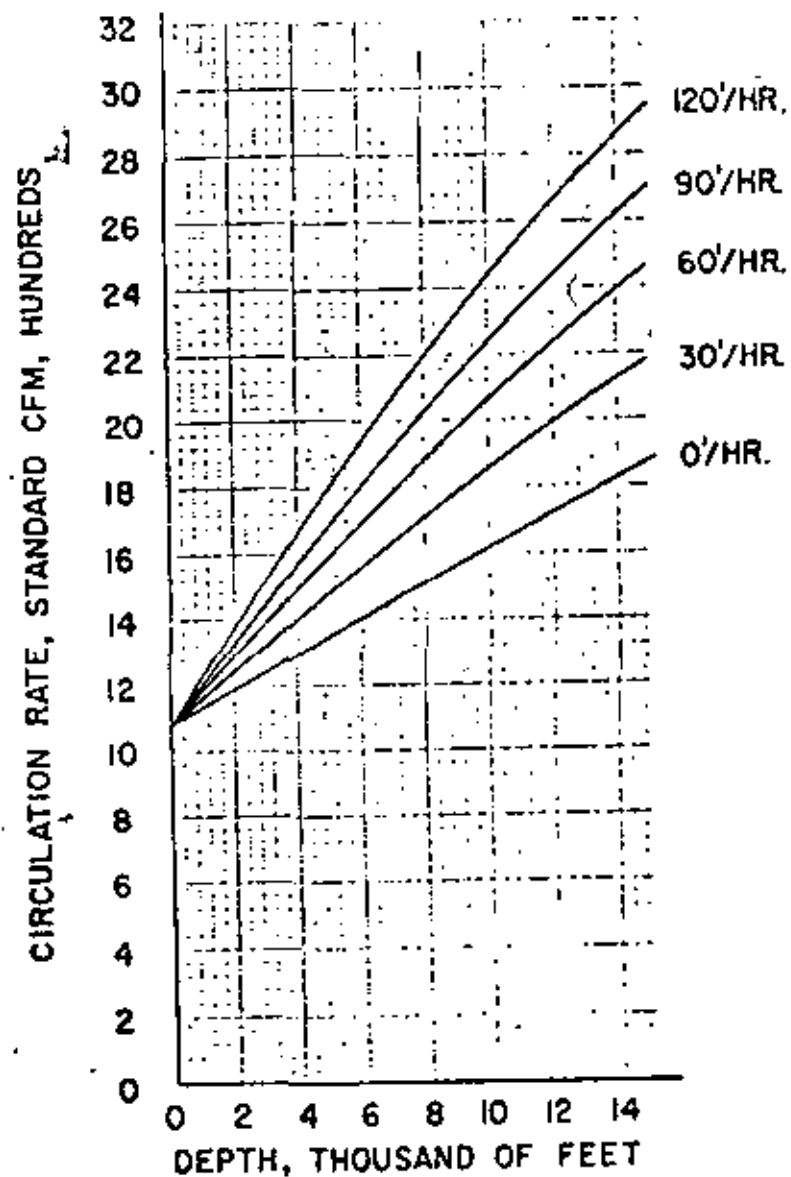
DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9 7/8"

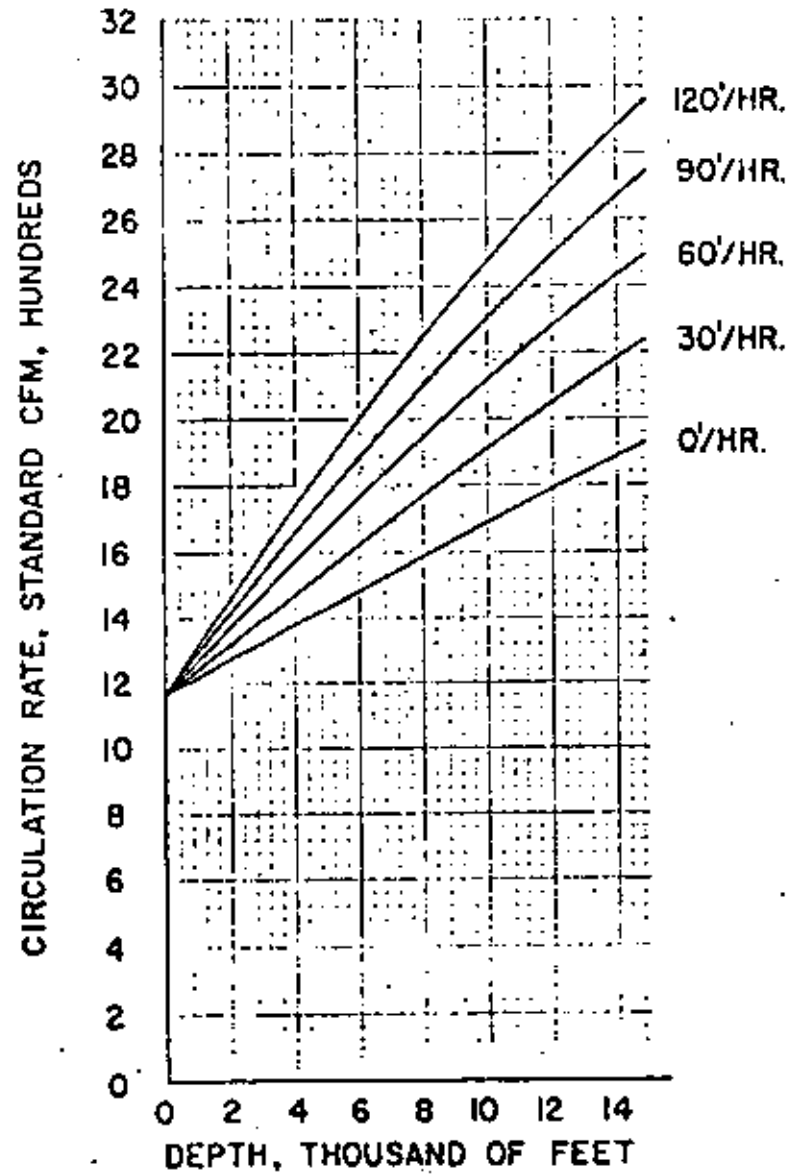
DRILL PIPE O.D. 5 1/2"





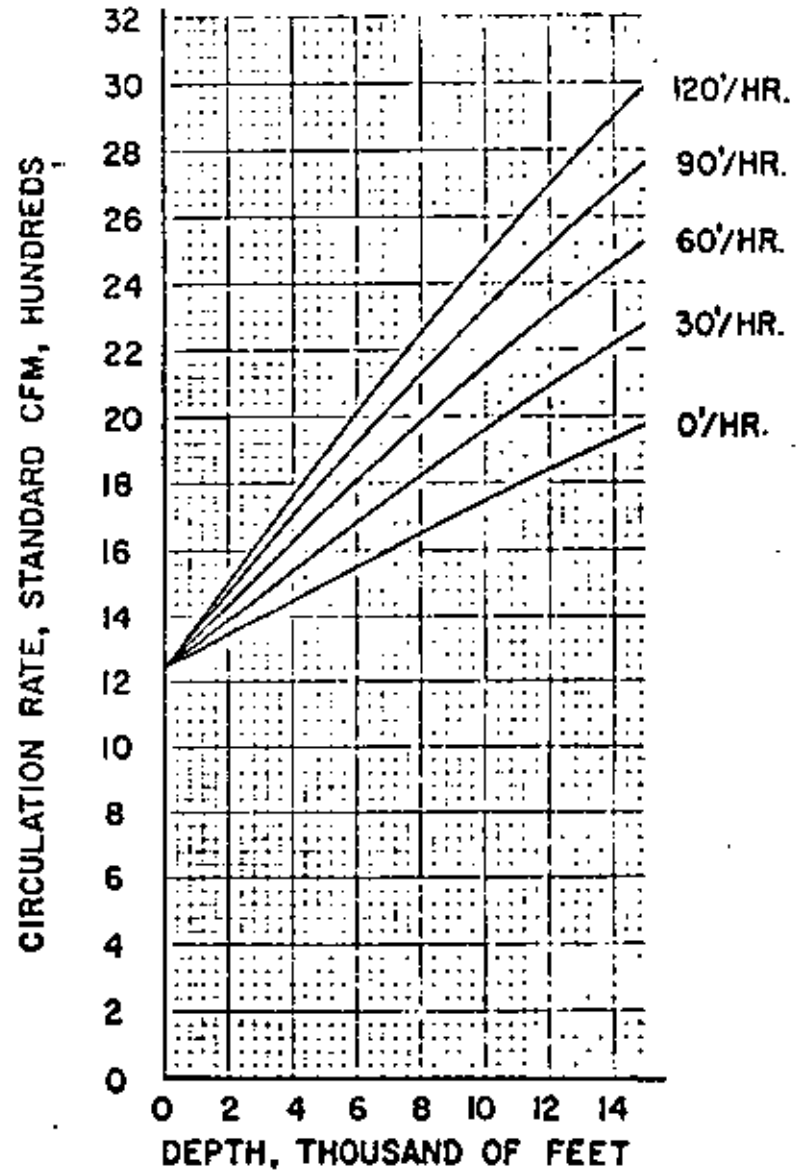
GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9 7/8" DRILL PIPE O.D. 5"



GAS GRAVITY 1.0

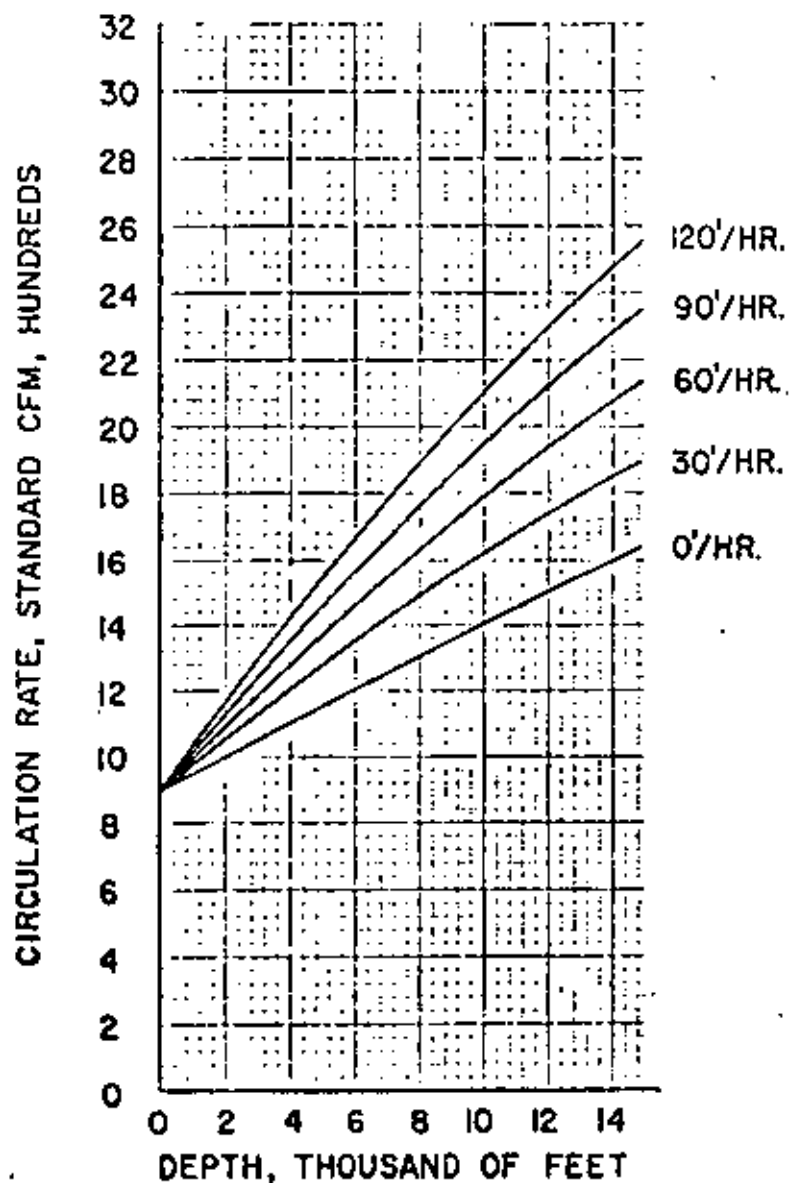
HOLE SIZE 9 7/8" DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9"

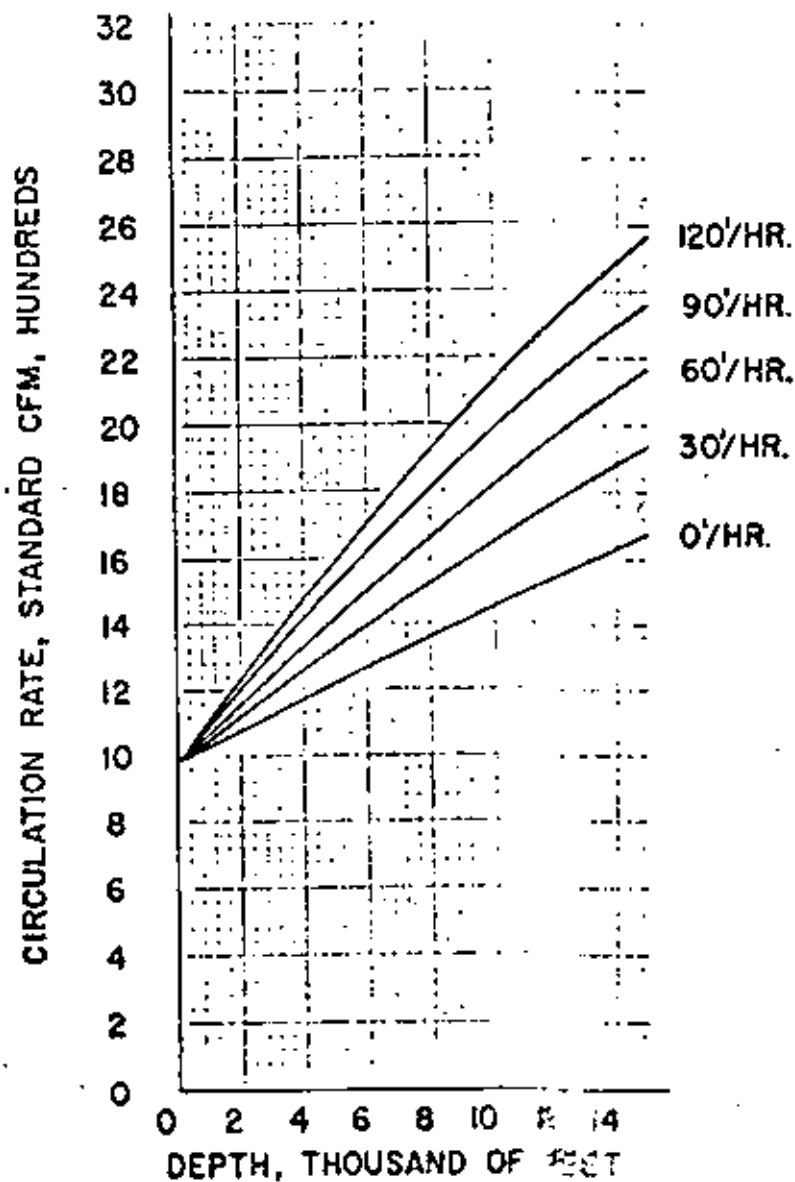
DRILL PIPE O.D. 5"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9"

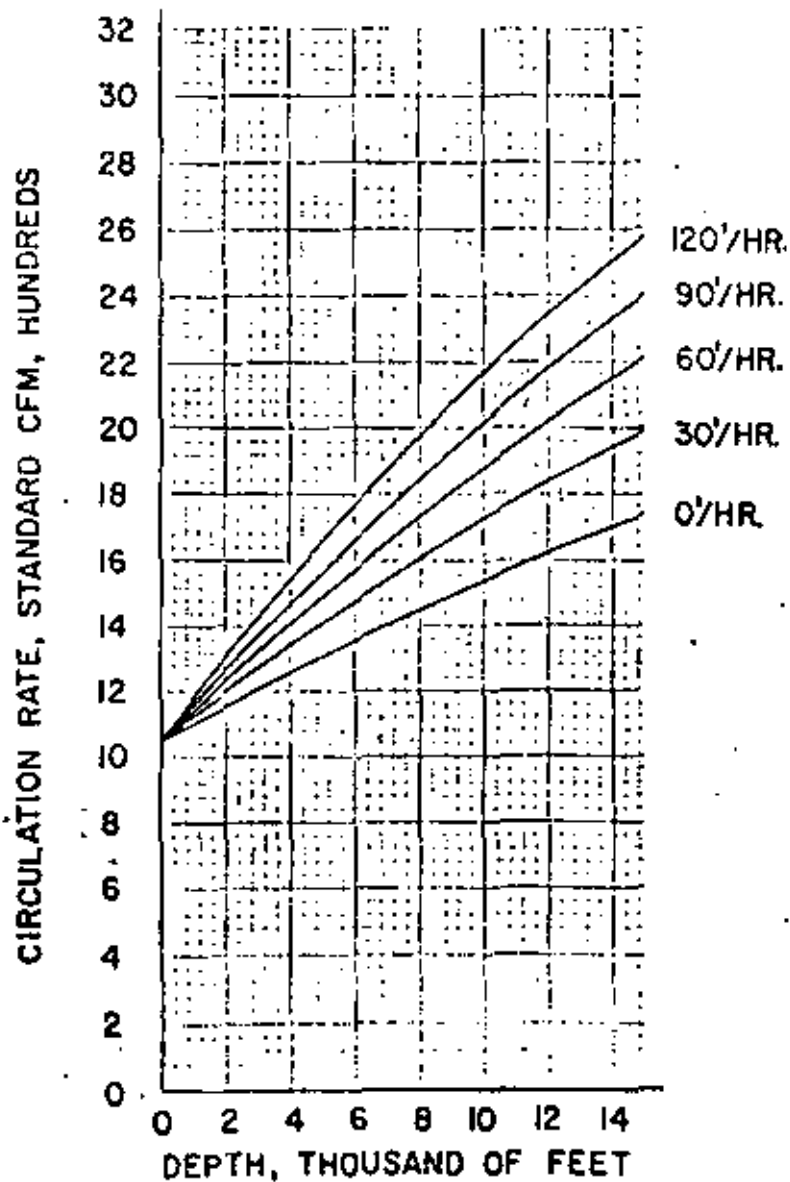
DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 9"

DRILL PIPE O.D. 3 1/2"

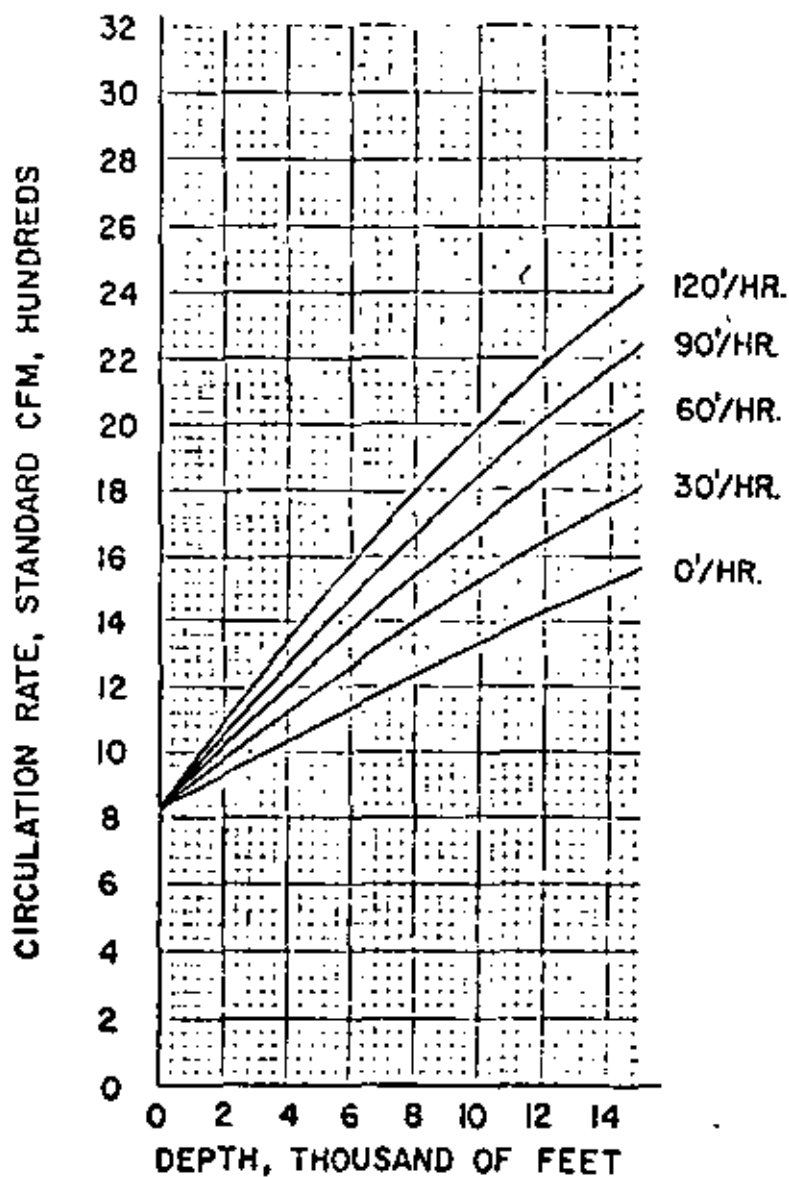


VOLUME REQUIREMENTS

GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 8 3/4"

DRILL PIPE O.D. 5"

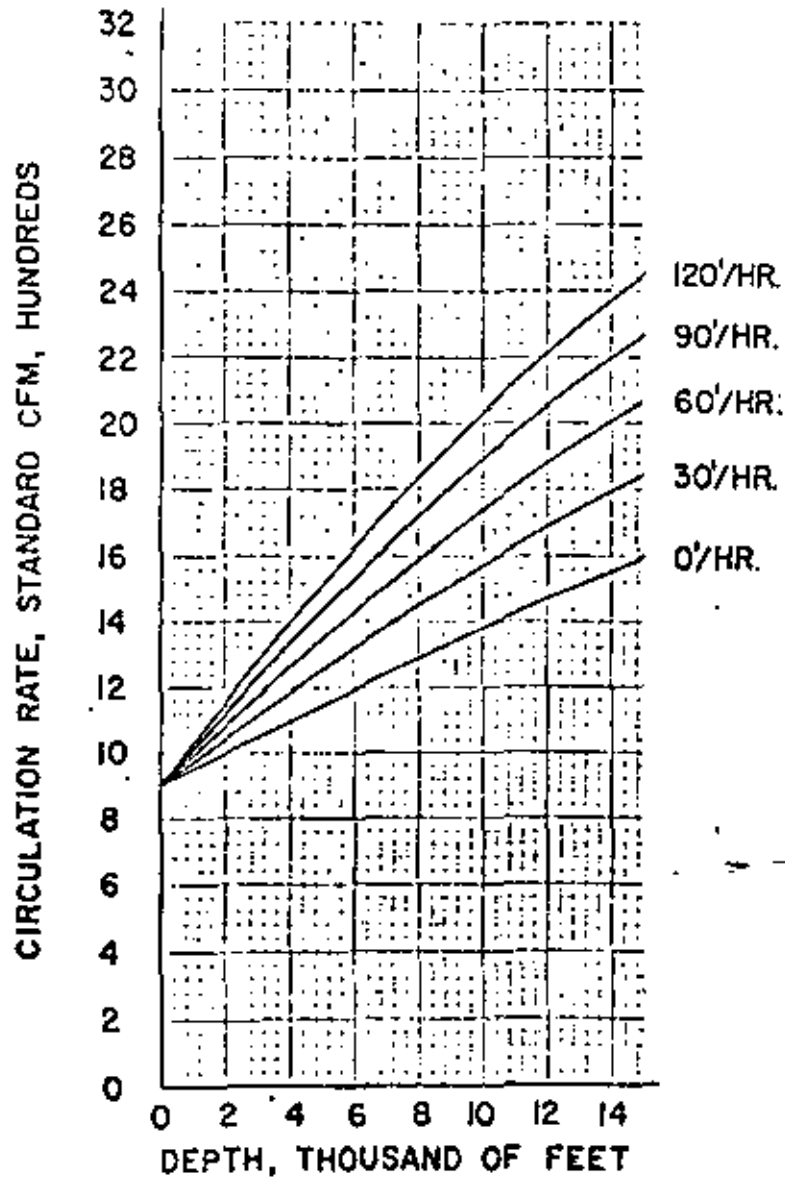


VOLUME REQUIREMENTS - 19



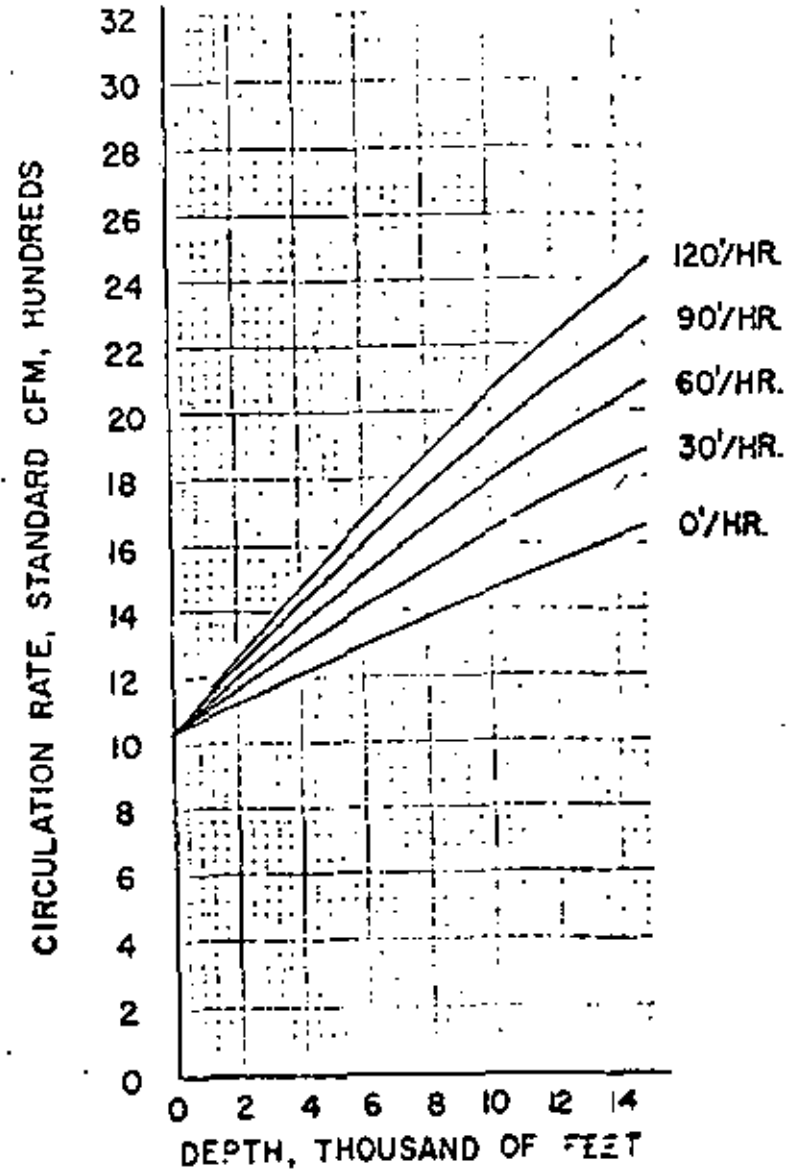
GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 8 3/4" DRILL PIPE OD 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 8 3/4" DRILL PIPE OD 3 1/2"

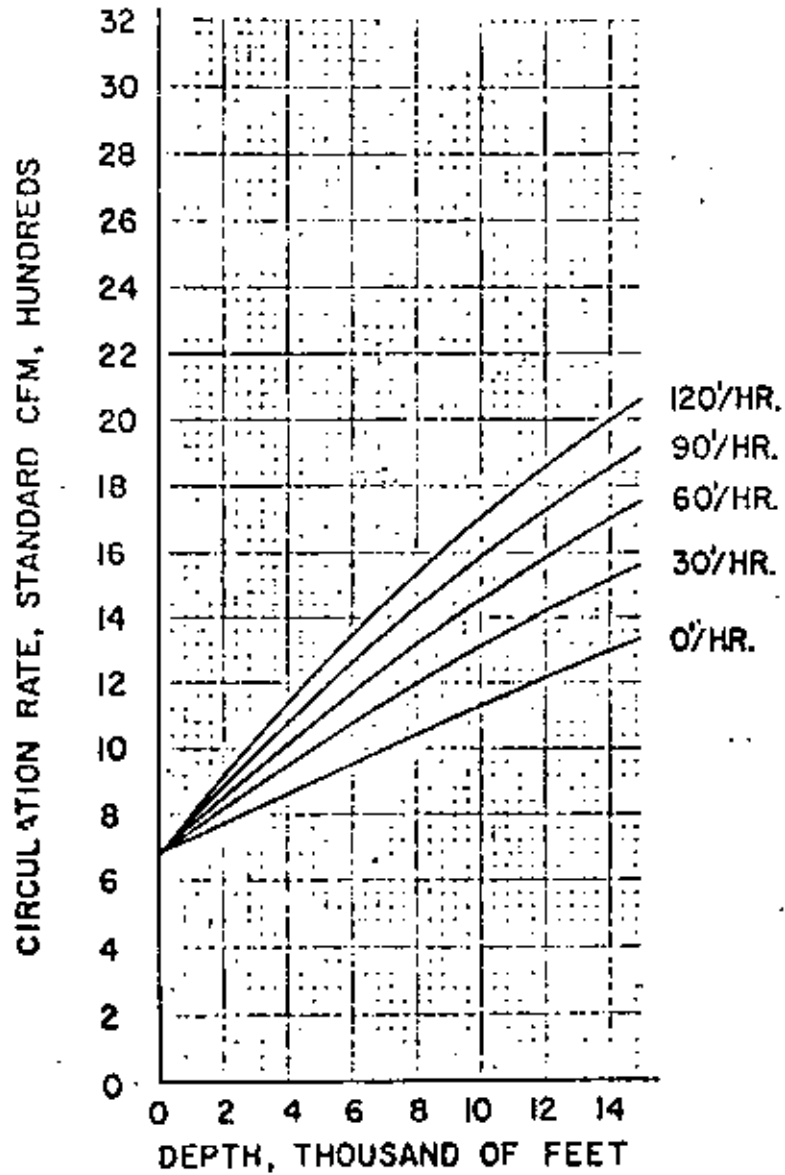




GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 7 7/8"

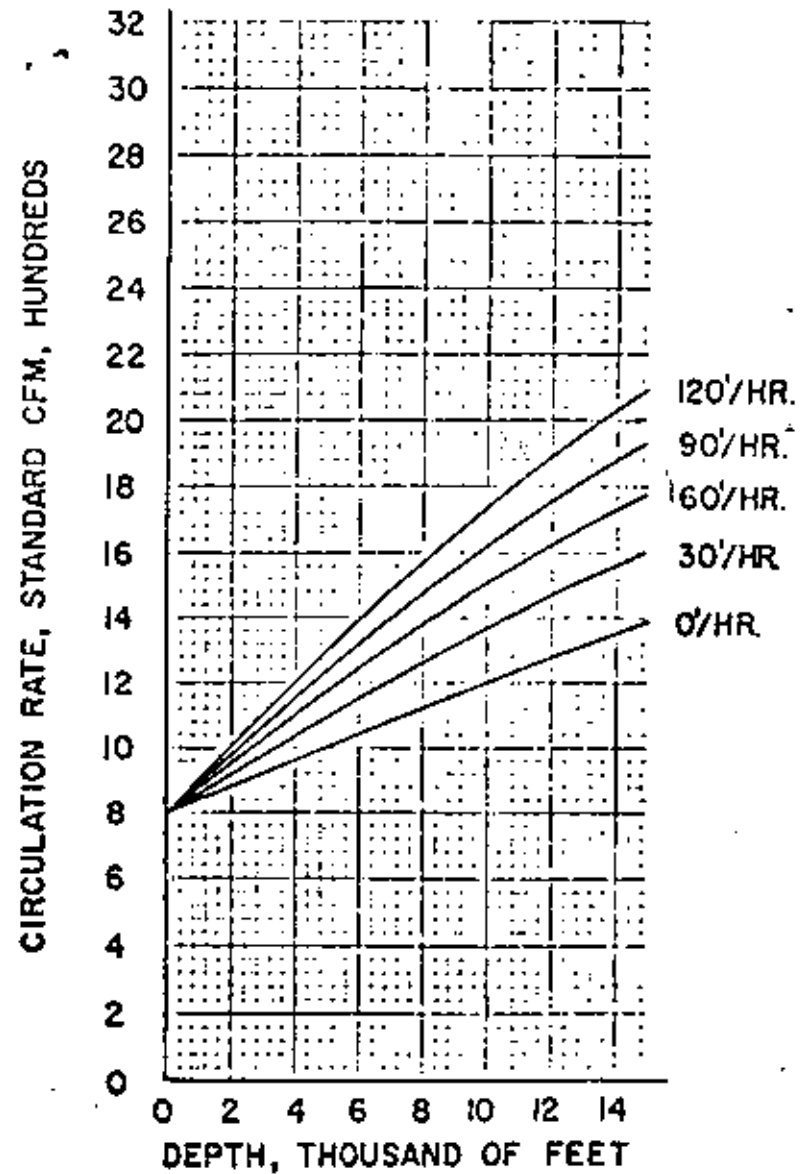
DRILL PIPE O.D. 4 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 7 7/8"

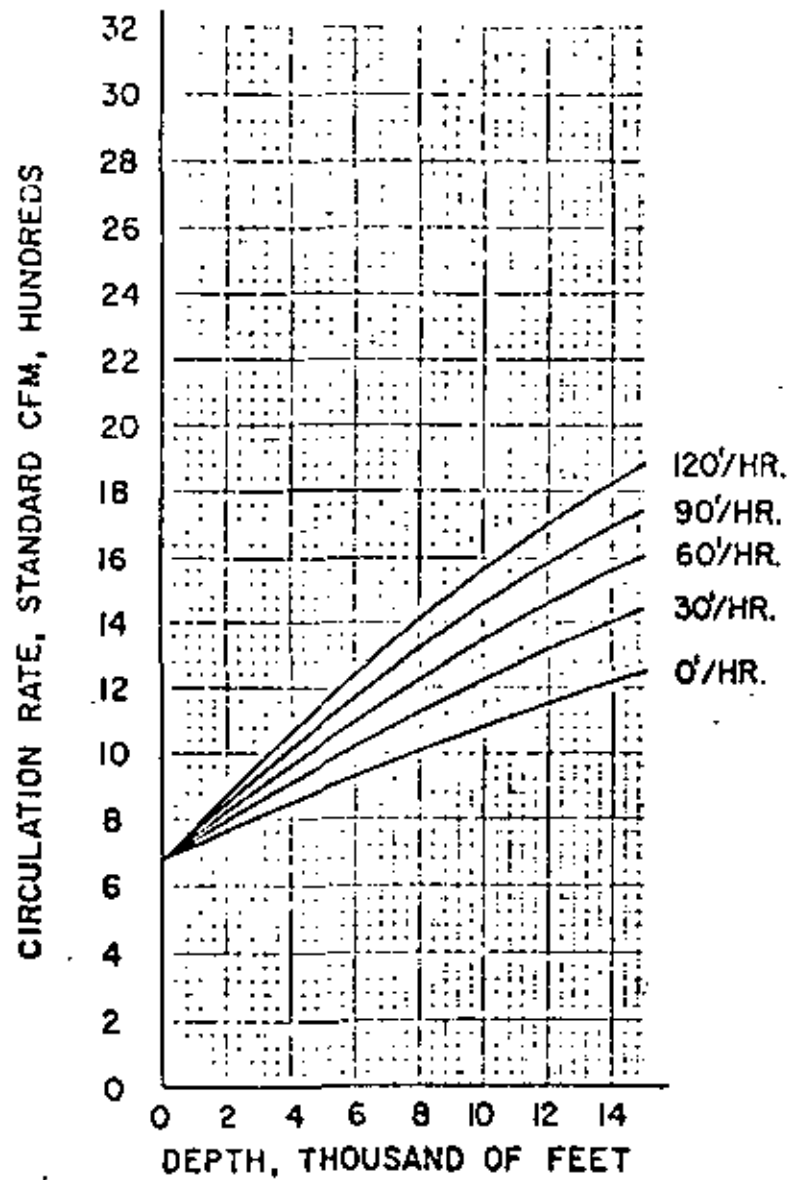
DRILL PIPE O.D. 3 1/2"





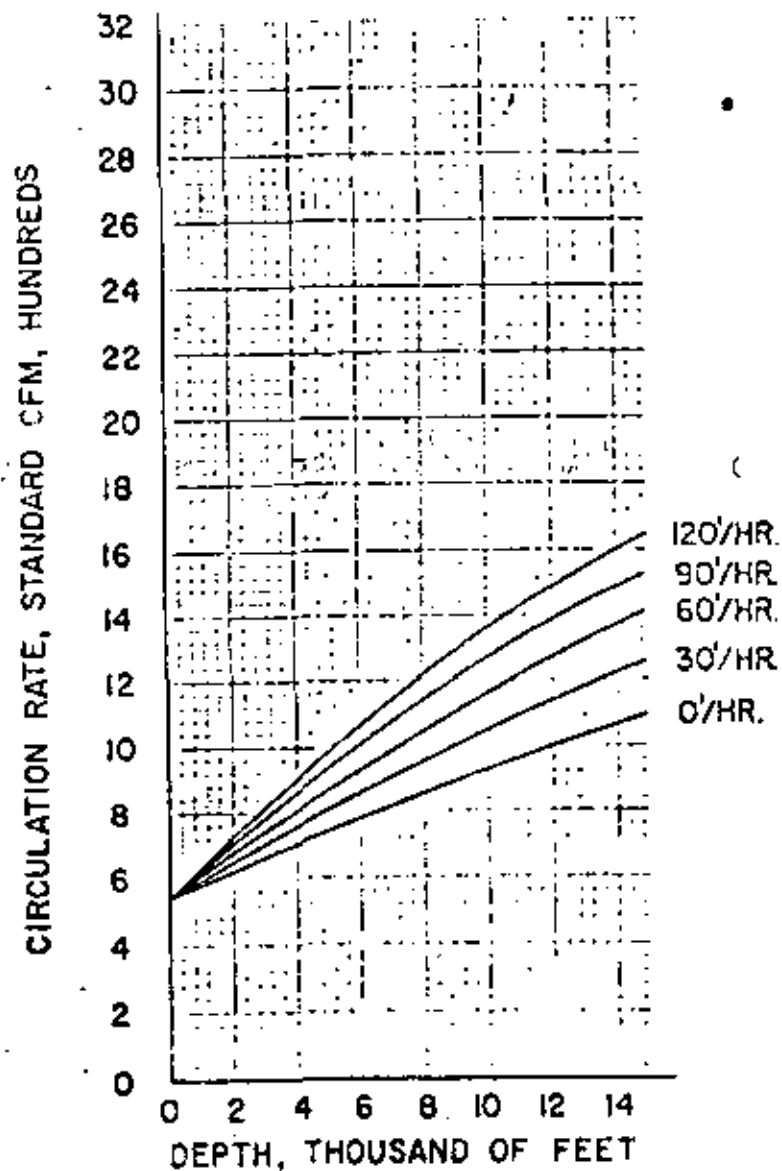
GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 7 3/8" DRILL PIPE O.D. 3 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

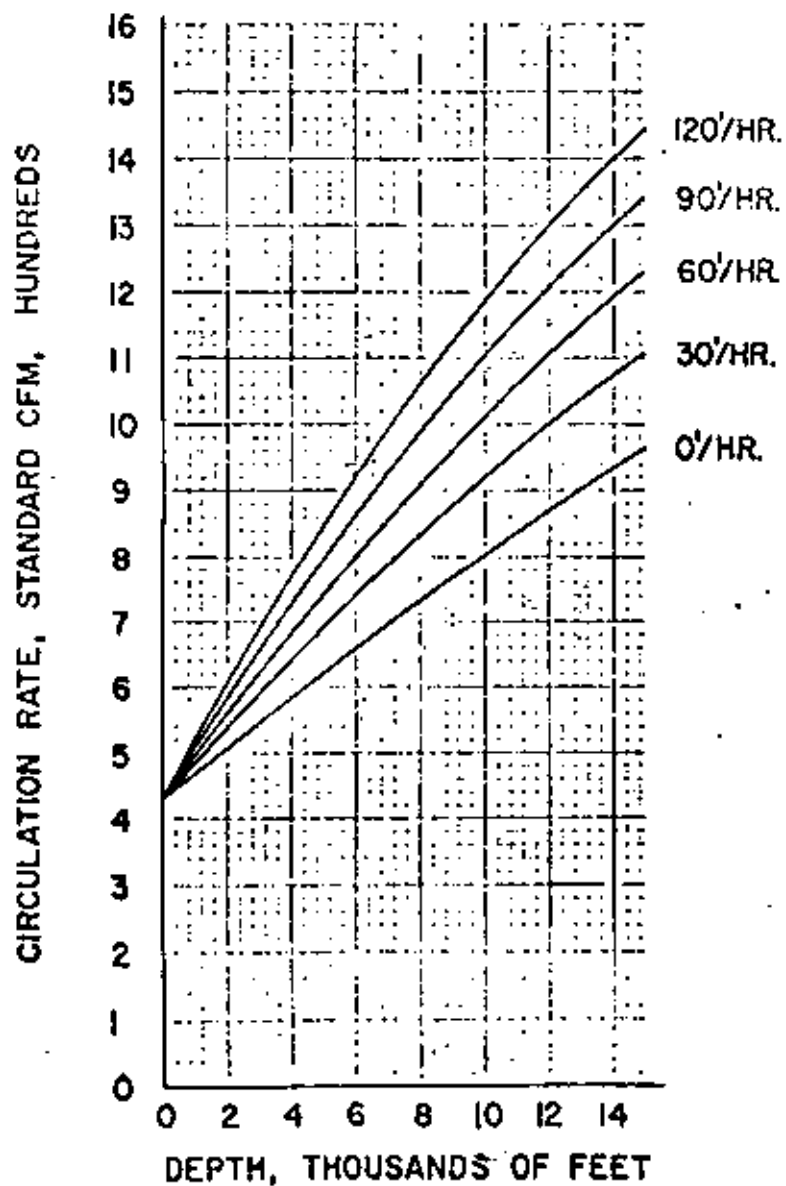
HOLE SIZE 6 3/4" DRILL PIPE O.D. 3 1/2"





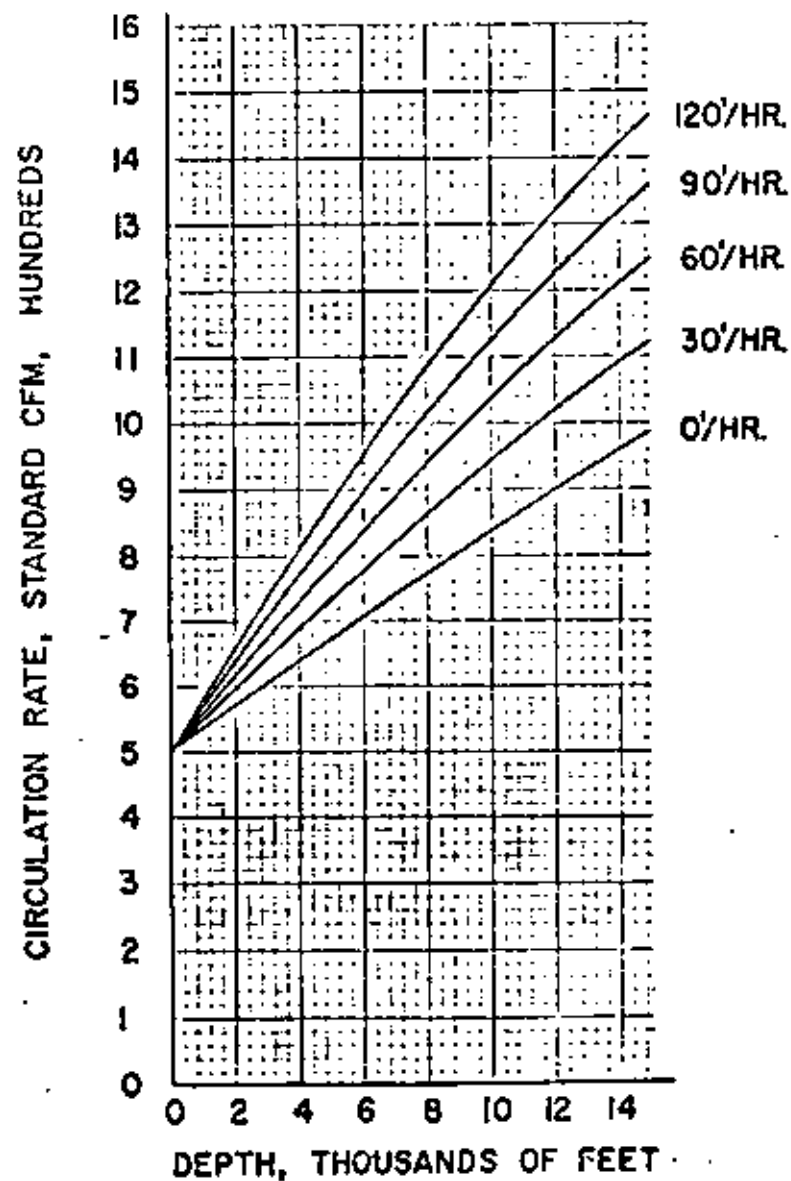
GAS GRAVITY 1.0

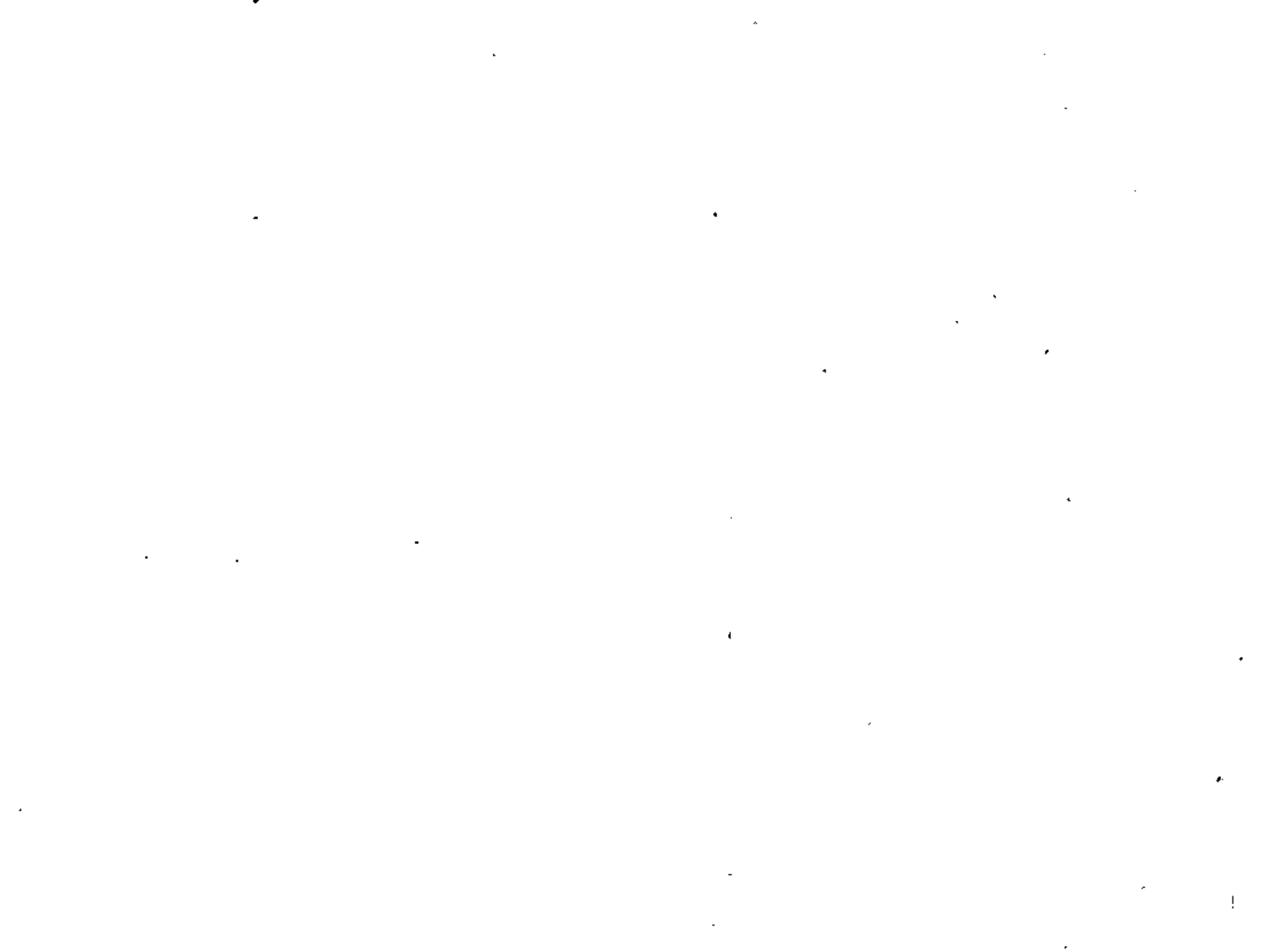
HOLE SIZE 6 1/4" DRILL PIPE OD. 3 1/2"



GAS GRAVITY 1.0

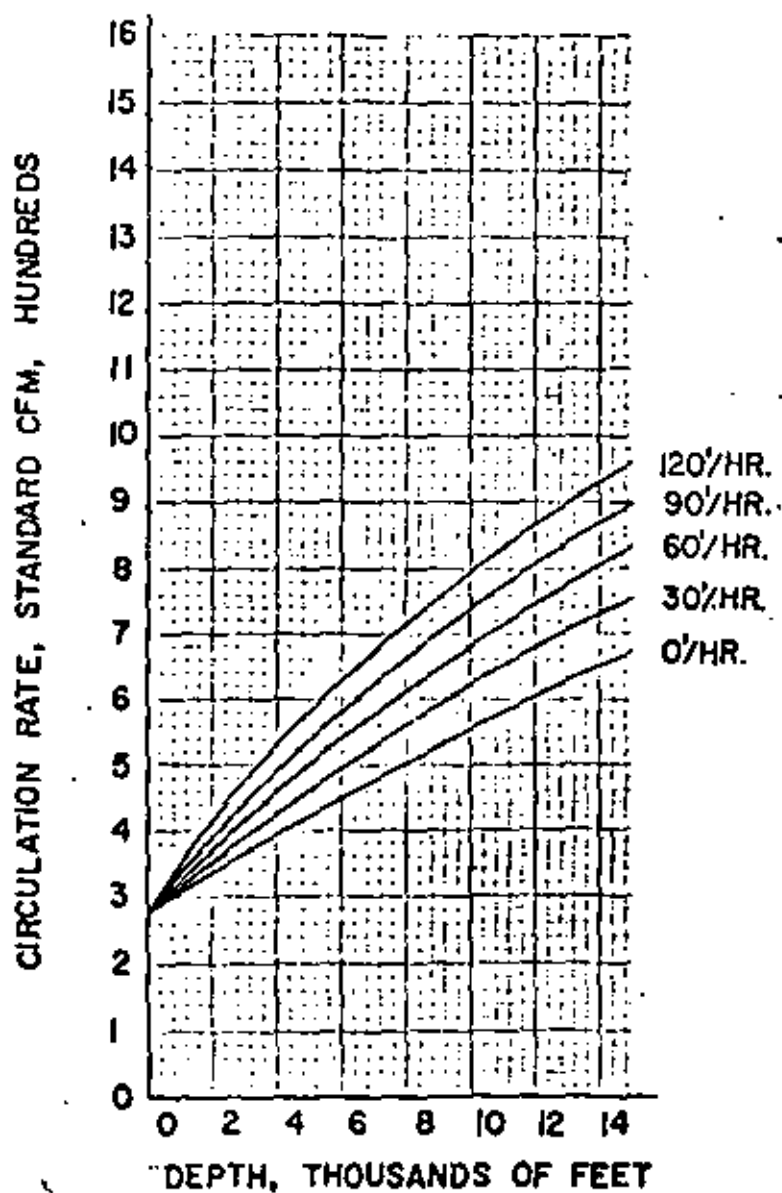
HOLE SIZE 6 1/4" DRILL PIPE OD. 2 7/8"





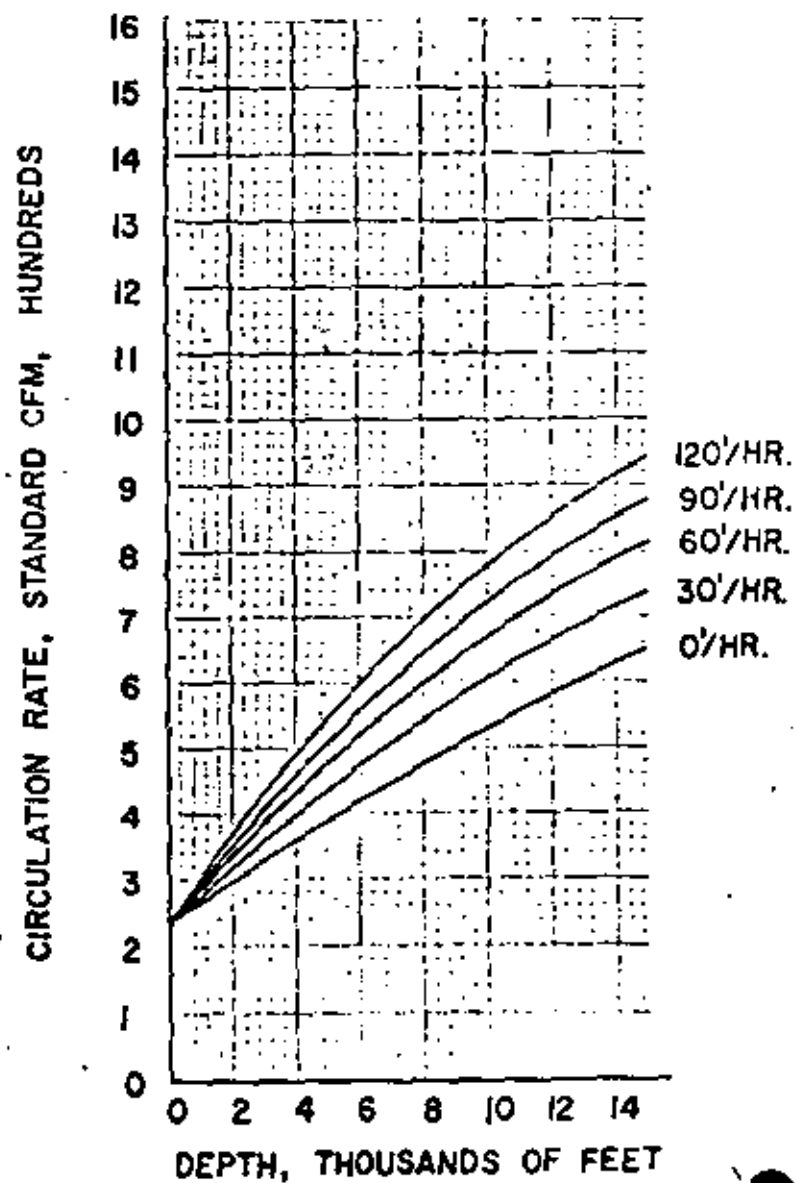
GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 4 3/4" DRILL PIPE OD. 2 7/8"



GAS GRAVITY 1.0

HOLE SIZE 4 3/4" DRILL PIPE OD. 2 3/8"



PERFORACION A ROTACION INVERSA

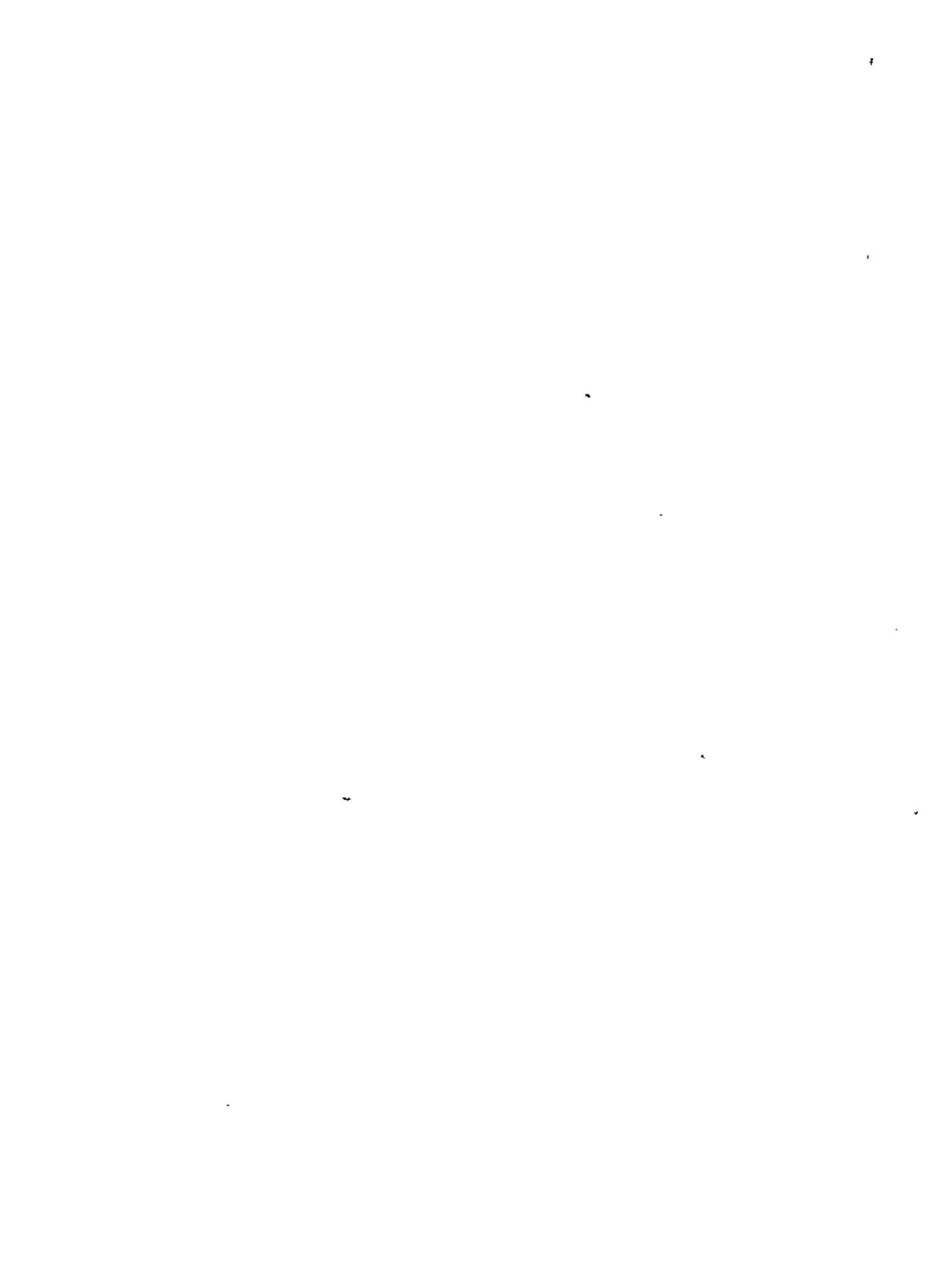
Los principios en que se basa este método son los mismos que -- los del método directo y los propios de los fluidos que se utilizan para la perforación en general.

Con este procedimiento podemos utilizar como fluido; agua, lodo o una combinación de estos con aire, conforme sea necesario de acuerdo a la formación que se vaya a perforar, y nos lo permita el método usado, utilizando generalmente el agua como fluido de perforación.

El método como su nombre lo indica, consiste en una inversión -- del sistema de flujo y tendremos así que el fluido, es alimentado directamente de las fosas al pozo, entre las paredes de la -- formación y la tubería, y el retorno se hace a través del interior de la tubería para lo cual se utiliza una bomba de vacío.

Los principales componentes en este sistema son los siguientes:

Bomba.- Se emplea una bomba centrífuga de un solo paso que -- ofrece grandes espacios al paso del fluido y a los cortes de perforación, en ocasiones hasta de 12.70 cm. (5") de diámetro aparente. Es usual una bomba de 15.24 cm. (6") de aspiración por 15.24 cm. (6") de descarga con capacidad de bombeo de 65 l.p.s.



Para iniciar la circulación del fluido, el equipo de perforación cuenta con una bomba reciprocante de vacío de pistones conectada a un tanque, a su vez conectado a la tubería de succión de la bomba centrífuga.

Con esta bomba centrífuga, es posible perforar hasta un máximo de 120 m. Puede también optarse por una bomba centrífuga de 20.32 cm. (8"). Figuras Nos. 4 y 5

Tubería de perforación.- Los tubos de perforación que se utilizan son de 15.24 cm. (6") a 20.32 cm. (8") de diámetro nominal, siendo las mas usuales de 15.24 cm. (6").

El límite de aspiración de la bomba, hace que los tubos hayan sido diseñados de 3.05 m. (10') de longitud y su acoplamiento se hace a base de bridas atornilladas. Figura No. 4

Cabeza giratoria (swivel) y flecha de la sarta de perforación (kelly). Con el propósito de no tener que usar una manguera de gran diámetro que vaya siguiendo el movimiento de ascenso y descenso de la cabeza giratoria, se diseñó un swivel fijo con un tubo lavador muy largo, donde se telescopa el "Kelly" para hacer las conexiones de los tubos de perforación. Figura No. 4.

Con el sistema se tiene la gran ventaja de que el área de retorno es bastante pequeña comparada con la perforación, por lo que



Para iniciar la circulación del fluido, el equipo de perforación cuenta con una bomba reciprocante de vacío de pistones conectada a un tanque, a su vez conectado a la tubería de succión de la bomba centrífuga.

Con esta bomba centrífuga, es posible perforar hasta un máximo de 120 m. Puede también optarse por una bomba centrífuga de 20.32 cm. (8"). Figuras Nos. 4 y 5

Tubería de perforación.- Los tubos de perforación que se utilizan son de 15.24 cm. (6") a 20.32 cm. (8") de diámetro nominal, siendo las mas usuales de 15.24 cm. (6").

El límite de aspiración de la bomba, hace que los tubos hayan sido diseñados de 3.05 m. (10') de longitud y su acoplamiento se hace a base de bridas atornilladas. Figura No. 4

Cabeza giratoria (swivel) y flecha de la sarta de perforación (kelly). Con el propósito de no tener que usar una manguera de gran diámetro que vaya siguiendo el movimiento de ascenso y descenso de la cabeza giratoria, se diseñó un swivel fijo con un tubo lavador muy largo, donde se telescopea el "Kelly" para hacer las conexiones de los tubos de perforación. Figura No. 4.

Con el sistema se tiene la gran ventaja de que el área de retorno es bastante pequeña comparada con la perforación, por lo que

la velocidad de retorno es mayor y consecuentemente el acarreo de los cortes y la limpieza mejor y mas rápida.

Este procedimiento permite trabajar con la mayor eficiencia en cuanto a la hidráulica en el retorno y nos permitirá acarrear partículas mucho mayores de cortes y practicamente el tamaño de gravas o cortes acarreados estará limitado por el diámetro interior de la tubería y por los ángulos que obligadamente damos en la parte correspondiente al swivel.

Otra característica adecuada es que se disminuye la erosión de las paredes y el arrastre de partículas del pozo y que además, el aumento del área por caídos y derrumbes no disminuirá nuestra velocidad de retorno, por lo que se seguirán acarreado los cortes con la misma eficiencia, además de que se cuenta con la ventaja de poder usar lodos de baja densidad, teniendo así muy limpias las paredes del pozo.

Con el fin de dar estabilidad a las paredes del agujero y prevenir socavaciones, debe mantenerse el pozo siempre lleno, durante todo el tiempo que dure la perforación, con el propósito de sostener la mayor presión hidrostática sobre las paredes del pozo. La inercia que desarrolla la columna hidrostática al descender, ayuda también a mantener estables las paredes del pozo. Figuras NOS. 4, 6 y 7.



La erosión que por el fondo de la barrena causa el sistema de circulación directa a lo largo de la perforación de pozo, en el sistema de circulación inversa, prácticamente no existe, y la erosión de las paredes no constituye un problema, ya que la velocidad del fluido en el espacio anular, es baja.

Como consecuencia de la forma de estabilización de las paredes del pozo con el sistema de circulación inversa, el suministro de agua al pozo cobra especial importancia, por lo que es necesario poder contar con un gran volumen de agua desde que se inicia la perforación. Se recomienda que las fosas de lodos puedan almacenar un mínimo de tres veces el volumen de agua que cubique el pozo que se va a perforar, repartido en la fosa de sedimentación y la fosa de abastecimiento. Figuras No. 2 y 3.

En cualquier caso, se pierde cierta cantidad de agua en las formaciones permeables al estarlas perforando; algunas partículas finas que se encuentran en suspensión en el fluido, se filtran a través de las paredes del pozo, cerrando parcialmente los poros y por tanto reduciendo la pérdida de agua. Sin embargo, cuando se están perforando formaciones arenosas o con grava, se necesita disponer de una cierta cantidad de agua considerable en todo momento.

Dependiendo de la permeabilidad de las formaciones que se pene

tren, se requerirá agregar agua en cantidades que pueden variar entre 1.0 y 30 l.p.s.

La pérdida de agua puede ser reducida utilizando lodos bentoníticos como fluidos de perforación, debiendo tener todas las precauciones para mantenerlo en buenas condiciones de viscosidad de tal forma que aisle la formación sin penetrar mucho a la formación.

La perforación de gravas gruesas y secas es la que presenta mayores problemas y en el caso de boleos grandes, este procedimiento que teóricamente sería el ideal, pierde sus ventajas al no poder avanzar rápidamente por la falta de peso en la herramienta.

Es conveniente recalcar, que una pérdida súbita de fluido que provoque que el nivel de agua descienda bruscamente, puede ocasionar socavaciones en el pozo y en el peor de los casos el atrapamiento de la herramienta.

Al inicio de la perforación, es necesario colocar un conductor de 2 a 4 m. de profundidad, para evitar la erosión de la boca del pozo y pérdidas innecesarias de agua. Sin embargo, no es necesario casi en ningún caso colocar un contrademe formal cementado.

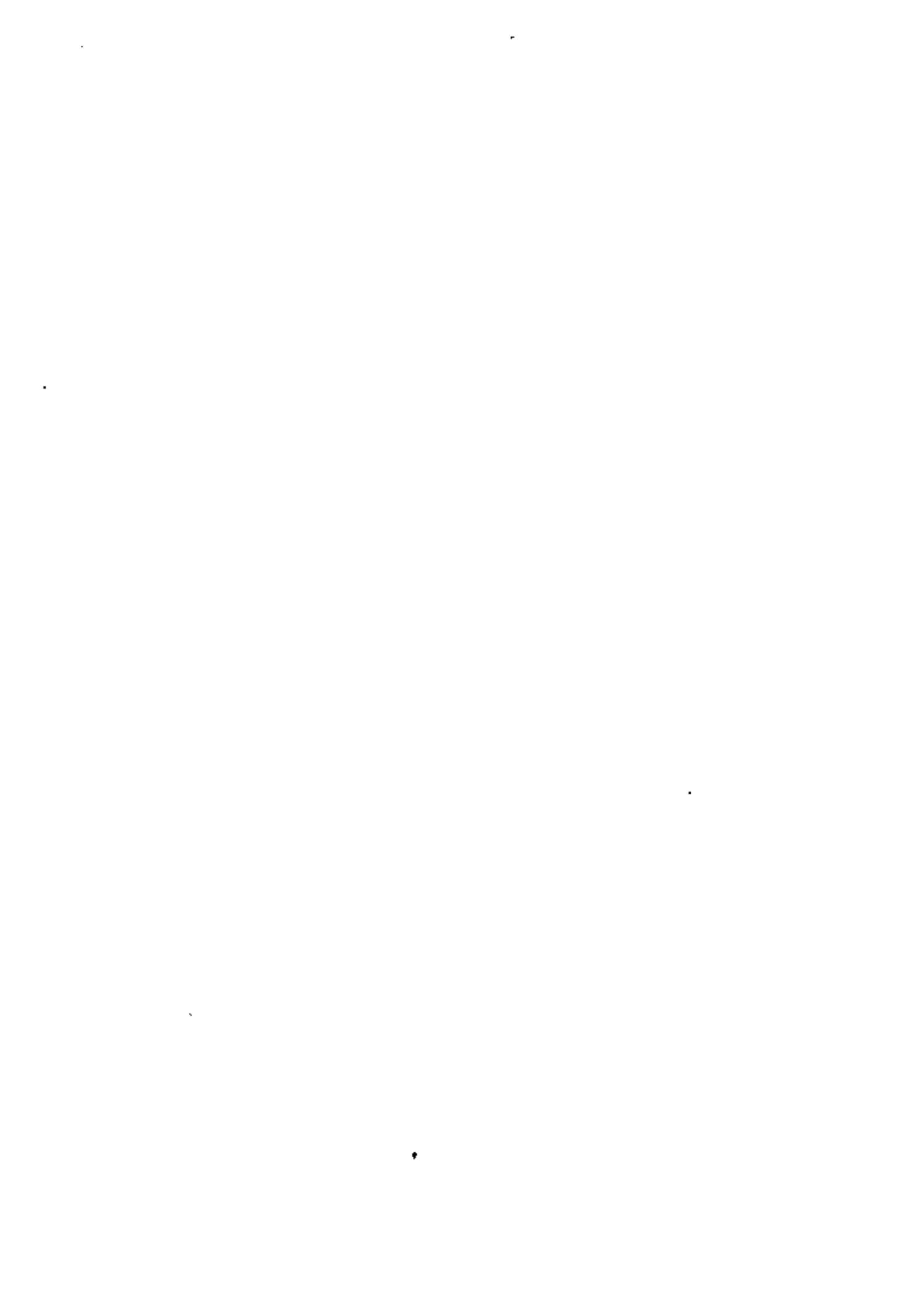


61

Como en este procedimiento es posible perforar directamente, - las barrenas que se emplean, son de gran diámetro y cuentan -- con una entrada por el fondo con un diámetro similar a los tubos de perforación y las brocas pueden ser del tipo "Cola de - Pescado" o "Drag", con dientes intercambiables de carburo tungsteno, aunque también pueden usarse barrenas construídas a base de cortadores o rolles, cuidando que cubran toda el área de - corte de la barrena y que reduzcan lo menos posible el espacio anular por donde circula el fluido. Figuras No. 5, 4 y 6 , el uso de un tipo de broca o del otro dependerá prácticamente de la dureza del material atravesado.

La velocidad de rotación disponible en la mesa rotaria es de - 10 a 40 rpm, la que utilizaremos en función de la formación -- que se esté perforando.

Gracias a la gran velocidad a que circula el fluido por dentro de la tubería de perforación, los cortes son arrastrados hacia la superficie inmediatamente que son removidos por la barrena, evitándose el tener que remoler el material cortado; lo cual - permite muy buenos avances de perforación. Velocidades de penetración de 50 cm./min. son frecuentemente observados y promedios de rendimiento de 10 m./h. son comunes a la terminación - de la perforación, esto claro está en materiales arenosos prácticamente sueltos, no consolidados y delgados.



Debido a que todo el material, producto de la perforación, es desalojado por el interior de los tubos, cuando se presentan boleos mayores de 13.0 cm., se acumulan en el fondo del agujero hasta que no es posible seguir perforando, en este caso, se recomienda sacar la sarta y sacar los boleos con un cucharón tipo almeja operado con la línea de maniobras.

Por las características citadas anteriormente, este procedimiento es muy adecuado para atravesar aluviones o materiales totalmente sueltos y la única desventaja es la de que como se perfora directamente a diámetros grandes, el torque que se genera es alto, lo que obliga a velocidades bajas de rotación y además como no es posible agregar peso desde un principio, su operación es lenta en los inicios, hasta que se cuenta con el peso suficiente para atravesar la formación, esto sobre todo cuando se tienen materiales gruesos superficiales.

Este procedimiento lo podremos utilizar convenientemente en perforaciones de diámetro grande en las que, al utilizar el método de circulación directa, tendremos velocidades de retorno muy pequeñas e insuficientes para elevar los cortes hasta sacarlos a la superficie.

También es posible en este caso, como ya se dijo anteriormente, utilizar agua o lodos de baja densidad y viscosidad, puesto que la capacidad de arrastre ya no estará en función de éstas



características, sino del área de retorno del interior de la tubería.

La tubería de perforación es de mayor diámetro que la normalmente utilizada en la directa, de tal forma que a la vez que su pequeña área permita una velocidad de retorno grande, sea lo suficientemente amplia para permitir el paso de gravas y hasta boleos grandes, en caso de no ser así, podría ser bloqueada la circulación.

La circulación inversa en su forma mas simple, contempla el uso de una bomba centrífuga conectada a la descarga proveniente del "swivel" de tal manera que se establece el sistema de circulación en función de la succión que pueda realizar la bomba, la alimentación se establece desde las fosas en forma automática al descender el nivel en el pozo.

Lo anterior presenta el inconveniente de que estará limitado a la capacidad de succión de la bomba centrífuga (entre 6 y 7 metros) y otro inconveniente es el fuerte desgaste que se tiene en los elementos impulsores de la bomba, además es necesario utilizar una bomba de cebado cada vez que se suspende la circulación.

Una modificación que mejora el sistema anterior es la de utilizar una bomba para crear un vacío a través de un eyector, colo-



cado en la tubería de descarga, este procedimiento tiene ventajas sobre el anterior procedimiento, primero porque se evita el desgaste de la bomba y en segundo lugar porque se logra un mayor vacío, lo que permite el trabajo con mayor diferencia de niveles.

Debido a la limitación de succión de los métodos anteriores se desarrolló un sistema de inclusión de aire comprimido en el retorno, de tal manera que la columna, en el interior de la tubería, es una mezcla de aire, lodos y corte, con una densidad mucho menor que la del fluido con que se alimenta el pozo, en esta forma se provoca un efecto de sifón, tendiente a equilibrar la columna de lodo existente en el anillo y la columna con aire en el interior de la tubería, iniciándose y manteniéndose así la circulación y extracción de cortas.

Entre mayor sea la diferencia de densidades, mayor será la capacidad de elevación y la velocidad de circulación, estando en función directa del volumen inyectado, aunque limitado por la mezcla que se logre, cuando no se cuenta con suficiente carga, puede no provocarse la acción de sifoneo, recirculando únicamente aire, en estos casos es recomendable incluir la menor cantidad de aire que nos permita el acarreo de lodo hasta la superficie, lo que resultará en una disminución de la velocidad de extracción de cortas y en consecuencia de velocidad de penetración, pero será posible trabajar mientras se tiene suficiente -



carga.

En forma contraria cuando el pozo recibe o aporta grandes cantidades de agua, mantendra una carga hidrostática importante sobre el fondo del pozo, misma que deberá ser vencida con la presión del aire inyectado.

El uso de compresores de baja presión (hasta de 100 lbs/pulg²) nos permite vencer cargas totales hasta de 70 mts. incluyendo las pérdidas de carga en el sistema, lo que para fines prácticos nos lleva a unos 50 mts. de profundidad bajo el nivel del agua.

Para proseguir a mayor profundidad lo mas práctico es el uso de los compresores de alta presión, existentes en el mercado que dan entre 250 y 300 lbs/pulg², que permitirán vencer mayores cargas, conforme a su capacidad.

Otra solución para establecer la acción de sifoneo, es mantener la inclusión de aire hasta aquella profundidad en la que aún es posible establecer el sifoneo, pero esto nos lleva a varias maniobras en cada cambio que incrementa grandemente los tiempos perdidos.

Para incluir el aire en la tubería de perforación se utilizan dos tubos exteriores con sus empaques y conexiones integradas a



- los tubos de perforación o doble tubería concéntrica que nos --
permite incluir aire a través del anillo que se forma y retorna
por el interior de la tubería de perforación, los tubos en el -
primer caso son acoplados con bridas atornillables y generalmente
se utilizan tubos entre 6" u 8" de diámetro, estas conexione
nes son lentas.

Actualmente se han desarrollado dos sistemas con tubos concéntr
tricos llamados Duo-Tube y Con-Core que presentan la ventaja de
poder añadir tubos con conexiones del tipo usual y empaques adecu
cuados que son unidos y desconectados rápidamente, lo que nos -
permite una mayor eficiencia en los tiempos de conexión.

El sistema Duo-Tube permite el acoplamiento de lastrabarrenas, -
con lo que es posible acelerar los tiempos de perforación donde
los materiales son mas grandes y duros, asimilándose este procedi
dimiento en estos casos, al utilizado durante la perforación dire
recta, de hacer un agujero exploratorio que sirve de guía y poste
riormente su ampliación.

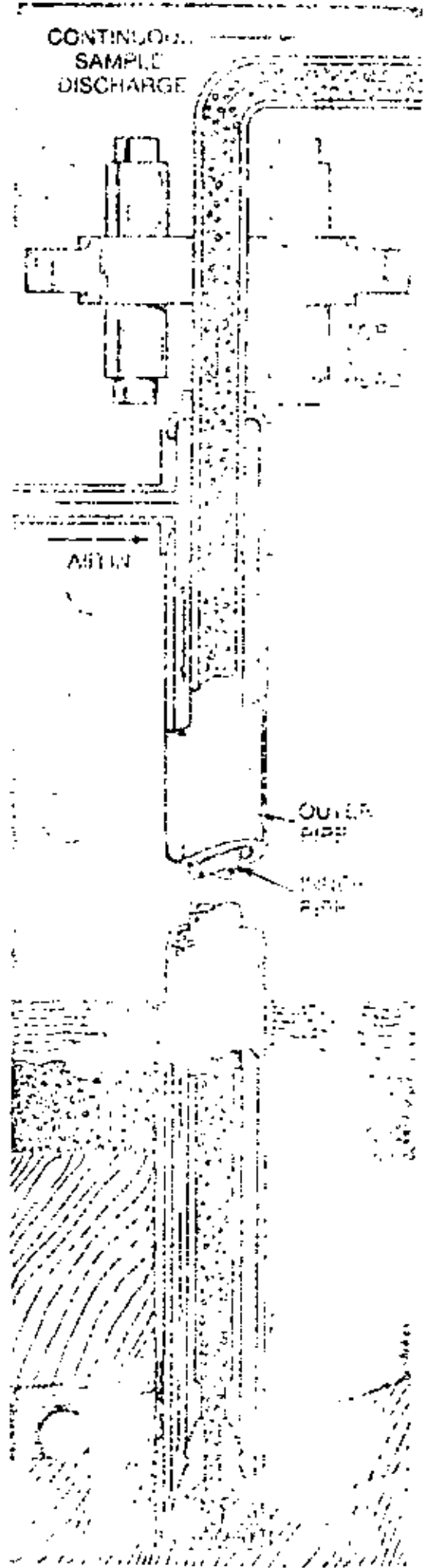
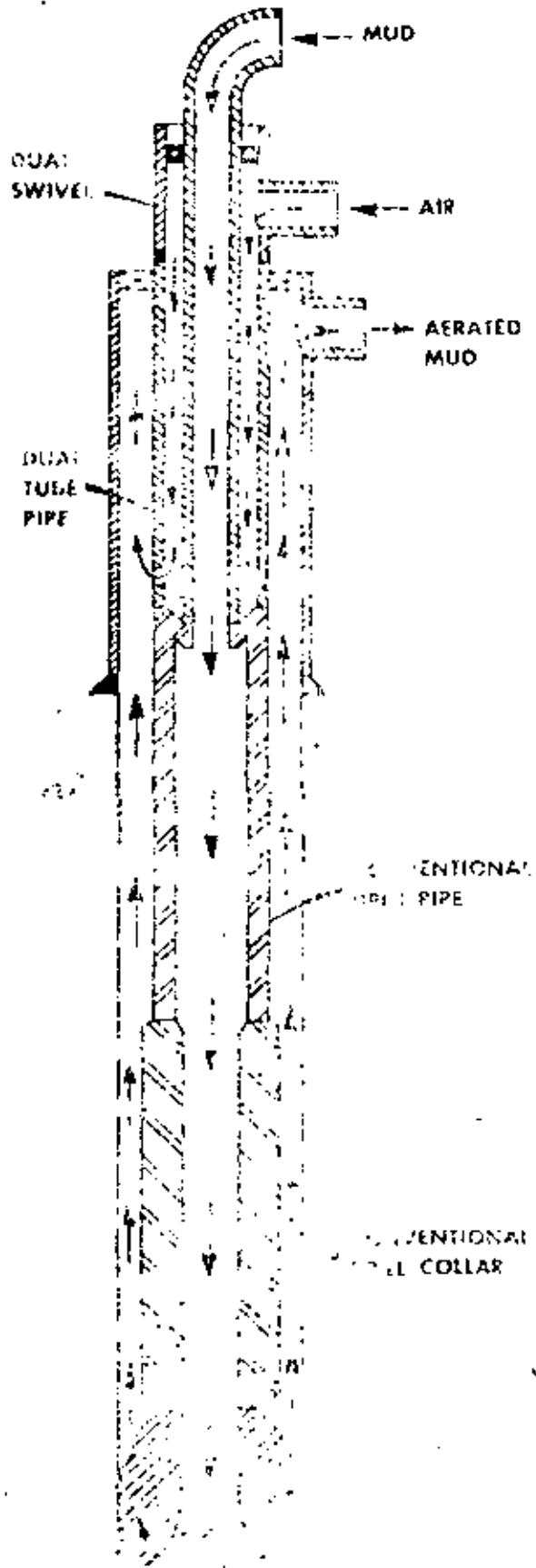
Este último método no ha sido muy usado y aún presenta dificultades
tades con los sistemas de empaque entre los tubos, lo que no ha
permitido su uso a gran escala.

Como conclusión de todo lo anterior podemos hacer notar que és
te procedimiento es muy efectivo, particularmente en zonas donde



de el abatimiento de aguas es problemático y además se presentan grandes pérdidas de circulación en la formación y ésta es de materiales gravo-arenosos y no consolidados.







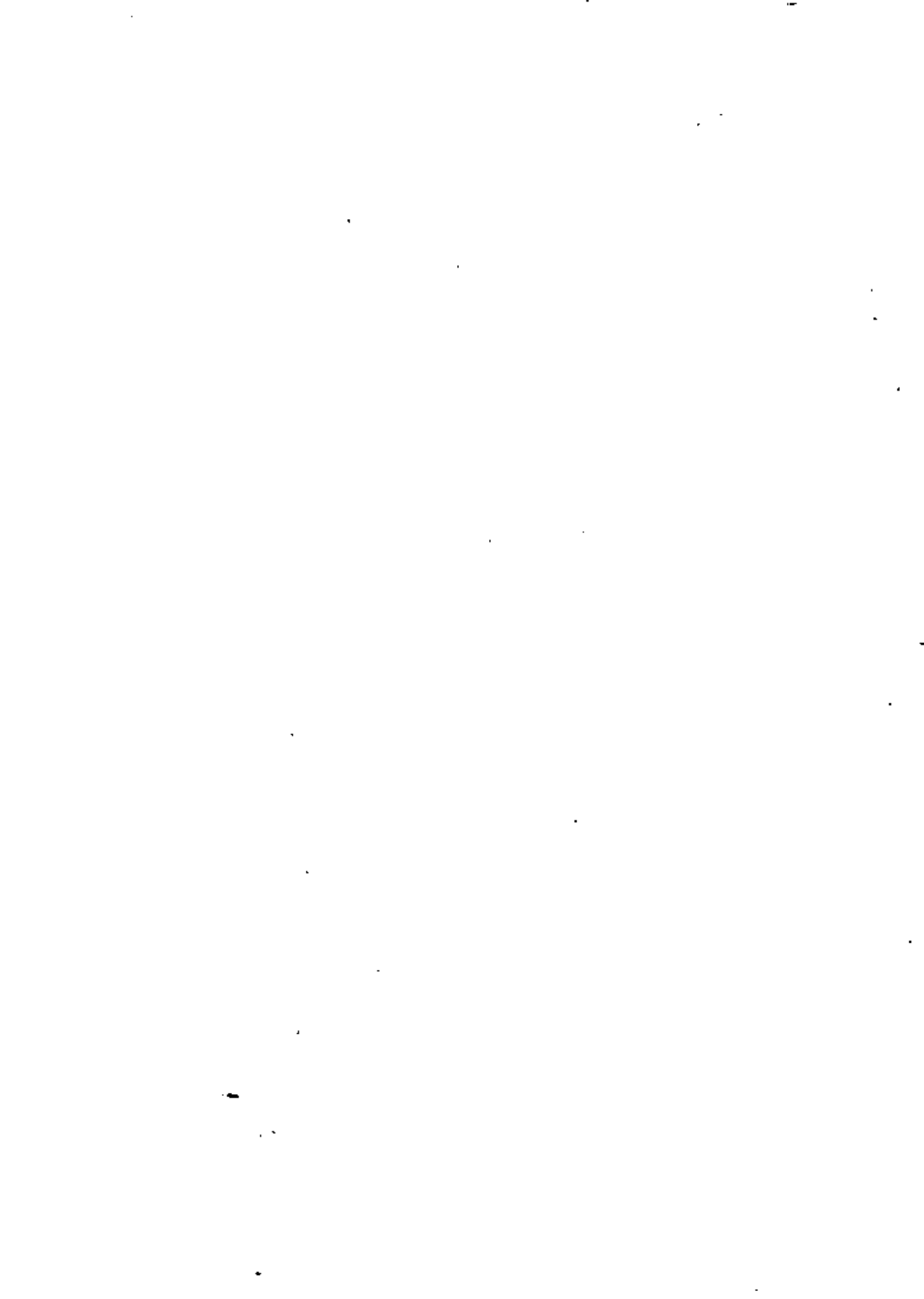
VENTAJAS DEL SISTEMA DE CIRCULACION INVERSA.

- 1.- CONSTITUYE UN MÉTODO RÁPIDO Y ECONÓMICA DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE AGUA EN MATERIALES ALUVIALES.
- 2.- EL FLUÍDO DE PERFORACIÓN ES AGUA CLARA, SIN EL USO DE BENTONITAS Y OTROS ADITIVOS.
- 3.- SE OBTIENE UNA ALTA EFICIENCIA EN EL APROVECHAMIENTO DEL ACUÍFERO, AL REDUCIRSE SU CONTAMINACIÓN Y AL PODER LIMPIARLO Y DESARROLLARLO EFICIENTEMENTE CON EL MISMO EQUIPO.
- 4.- LA COLOCACIÓN DE FILTROS DE GRAVA GRANDES Y BIEN DISEÑADOS PERMITE PREVENIR ARRASTRE DE MATERIALES FINOS DE LA FORMACIÓN, ALARGANDO LA VIDA DEL POZO, REDUCIENDO SU MANTENIMIENTO Y ALARGANDO LA VIDA DEL EQUIPO DE BOMBEO.



DESVENTAJAS DEL SISTEMA DE CIRCULACION INVERSA

- 1.- ESTÁ LIMITADO A ACUÍFEROS DE MATERIALES SUAVES NO CONSOLIDADOS (ALUVIONES)
- 2.- REQUIERE DE UN SUMINISTRO DE AGUA EN GRANDES VOLÚMENES.





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



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

EVALUACION DE POZOS

OCTUBRE, 1980



EVALUACION DE POZOS

Comentarios de Carlos Cruickshank

1. Pruebas de bombeo

1.1 Desarrollo

Una vez terminado el pozo se realiza su desarrollo; esto es una fase de limpieza del lodo que ha quedado de la perforación entre la tubería ranurada y el acuífero, que se llena normalmente con un filtro de grava y gravilla. Aparte de desarrollos especiales con hielo seco y de otro tipo, se acostumbra agitar el pozo por medio del bombeo alternado, ya sea que se incremente el bombeo escalonadamente o bien se inicie y suspenda alternativamente.

Si se observan los niveles dinámicos durante esta fase, se tiene una primera información valiosa acerca del comportamiento del pozo; realmente, estos bombeos constituyen pruebas cortas de bombeo, cuya interpretación da además, una estimación de las pérdidas por entrada y flujo en la tubería del pozo, como se indica en las notas.

1.2 Prueba formal de bombeo

El objetivo de las pruebas de bombeo es estimar características de la formación acuífera como son su transmisividad, coeficiente de almacenamiento y algunas otras como la influencia de fronteras laterales y verticales del acuífero. La

metodología para su interpretación se basa en el ajuste del comportamiento del pozo a una situación ideal para la que se conoce la solución teórica. Dicha solución ideal puede tener dos tipos de comportamiento hipotético: el de flujo establecido o bien el de flujo no permanente; el primero de ellos es el más simple en cuanto a observaciones por realizar: basta determinar el gasto bombeado y niveles piezométricos después de un tiempo largo de bombeo; sin embargo, la información que puede obtenerse con el segundo tipo de análisis y que requiere de un mayor número de observaciones piezométricas es mucho más completo y se basa en hipótesis menos restrictivas que en el primer tipo. Es por esta razón que hoy en día se realizan siempre las observaciones conducentes a analizar el comportamiento del acuífero como un fenómeno no permanente.

Existe desde hace tiempo en México, un instructivo para la realización de pruebas de bombeo elaborado en la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos por el Departamento de Aguas Subterráneas de la Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas. Se refiere ahí al equipo que conviene utilizar, la frecuencia de las observaciones piezométricas, etc.: una prueba de bombeo debe cumplir con la constancia del gasto bombeado desde su inicio, ya que alguna variación llevaría a interpretación errónea de la prueba, frecuencia alta en las observaciones al principio de la prueba, sobre todo en el pozo de bombeo y en los pozos de observación cercanos al mismo. Por lo anterior conviene que el personal que rea



liza la prueba tenga experiencia y que en cualquier caso efectúe pruebas preliminares con su equipo. Se debe también evitar en lo posible la interferencia de otros pozos de bombeo cercanos, por lo que, si la prueba se realiza en un acuífero en explotación, conviene hacer la prueba en una época en que la mayor parte de los pozos no bombeen (periodo lluvioso, de reparación, etc.).

La interpretación, como se indicó, es el ajuste del comportamiento del pozo durante la prueba de bombeo al que tendría un pozo en un acuífero esquematizado lo suficiente como para tener solución analítica. El caso más simple es el de un acuífero confinado de espesor constante y características homogéneas en toda su extensión. La solución al flujo en este caso la dió Theis en 1935 adaptándola de una ya existente para el flujo de calor en una placa a la que se enfría en un punto. La solución es una relación funcional entre dos parámetros adimensionales:

$U = r^2 S / 4Tt$ y $Q_a = 4\pi Ta / Q$ donde S- coeficiente de almacenamiento, a- abatimiento piezométrico, r- distancia al punto de bombeo, T- transmisividad, t- tiempo desde el inicio de bombeo, Q- gasto de bombeo. Como estos dos parámetros son proporcionales a dos variables medidas en la prueba, a y t, se pueden superponer, hasta hacerlas coincidir, la llamada curva tipo de la función solución al problema -- $Q_a = W(U)$ y los puntos definidos por las parejas de valores a y 1/t medidos durante la prueba de bombeo. En esta forma con la equivalencia de $W(U) = 4\pi Ta / Q$, se despeja T en fun

ción de a y Q conocidos y con la equivalencia $U=r^2S/4Tt$, se despeja S en función de r , t y T también conocidos.

Un procedimiento similar se sigue para otras situaciones diferentes a las del acuífero confinado, para el que existen soluciones teóricas. Tal es el caso de acuíferos semiconfinados (cuya solución es función de tres parámetros adimensionales), de pozos parcialmente penetrantes, de pozos en acuíferos freáticos, etc. A qué tipo de situación debe ajustarse el comportamiento del pozo depende en gran parte del conocimiento de la geología y de la estratigrafía que se tenga de la zona y la solución que se obtenga debe ser congruente con la situación física.

También, cuando se tiene la posibilidad de observar la evolución del abatimiento en más de un pozo de observación, los resultados deberían coincidir, o diferir en forma que pueda explicarse con una variación razonable de las condiciones del acuífero.

Cuando las fronteras del acuífero pueden influir sobre el pozo, la interpretación de la prueba de bombeo ayuda a definir su influencia; así, de un acuífero semiconfinado, se obtiene la influencia de la capa semiconfinante, su aportación, características físicas, etc.; de una frontera impermeable o de recarga, su distancia al pozo.

2. Cuantificación y explotación

Como se ve de la discusión anterior, la información que proporciona una prueba de bombeo se refiere a las características físicas del acuífero en las inmediaciones del pozo pero no tiene ninguna relación con la potencialidad del acuífero, o sea, con la cantidad total de agua que puede aprovecharse del mismo sin producir efectos adversos como abatimientos excesivos, contaminación salina, etc. Para esto, es necesario realizar análisis sobre áreas de mayor extensión que la que influencia a un pozo, de ser posible, la extensión total del acuífero.

Los análisis de cuantificación son en esencia balances de masa sobre un volumen de control que es la parte del acuífero analizada. Como siempre, un balance de masa está expresado por la fórmula: entradas menos salidas igual a cambio de almacenamiento en un período determinado. Las entradas posibles a un acuífero son flujos subterráneos, infiltraciones y aportaciones de otras formaciones como pueden ser acuíferos o acuíardos sub o suprayacentes al analizado. Las salidas pueden ser flujos subterráneos, descargas a corrientes o a la atmósfera, aportación a otras formaciones y extracciones por bombeo. El cambio de almacenamiento queda definido por la evolución global de la superficie piezométrica y la distribución de coeficientes de almacenamiento. Esto se expresa



0

con la siguiente suma de volúmenes

$$F_e + I + V_+ - F_s - D - V_- - B = SA\Delta H_m$$

donde:

F_e volumen por flujo subterráneo de entrada

I infiltraciones directas o de corrientes superficiales

V_+ aportación de otras formaciones

F_s volumen por flujo subterráneo de salida

D descargas a la atmósfera (evapotranspiración)

V_- aportación a otras formaciones

B volumen extraído por bombeo

S coeficiente de almacenamiento

A área del acuífero

ΔH_m incremento medio del nivel piezométrico en el volumen de control considerado.

Todos estos términos varían con el tiempo, aun en un acuífero virgen sin explotación, más entre mayor sea su comunicación con la superficie, por las variaciones estacionales y anuales de los flujos superficiales.

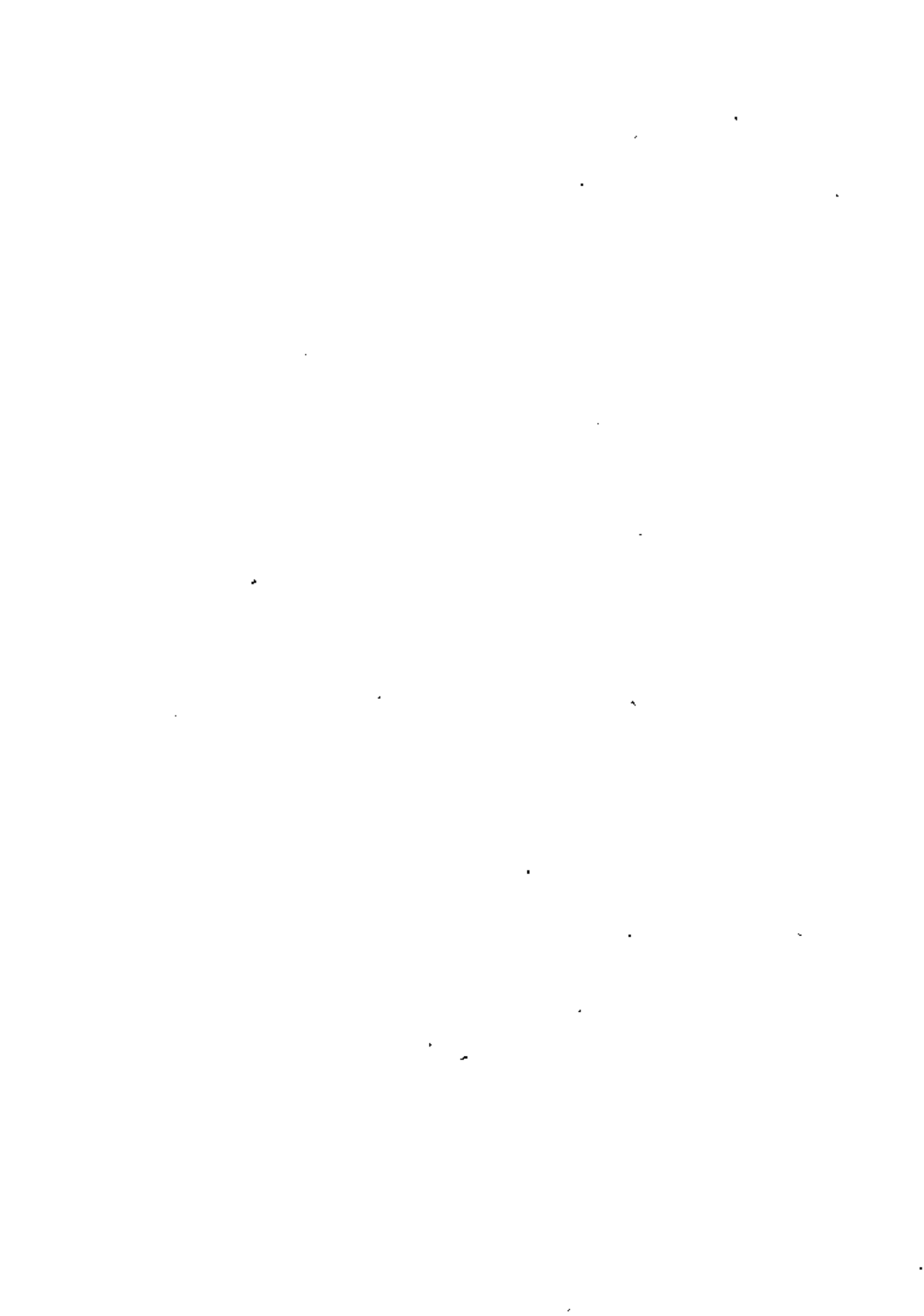
En cuanto el acuífero empieza a ser explotado, la variación es obligada aún en los más desconectados del flujo superficial.

En casos normales de acuíferos conectados con la superficie, los términos más importantes del miembro izquierdo de la ecuación del balance son I y D , si se comparan con F_e y F_s y en su mayor parte se relacionan con corrientes superficiales. Los casos normales de acuíferos no conectados con la superficie,



tienen como términos relevantes a V_+ y V_- . En el primer caso, cuando se realiza una explotación por bombeo, el agua proviene en su mayor parte de un incremento en la infiltración y de una disminución de la descarga producidos por el abatimiento y del almacenamiento del acuífero. En el segundo caso, el volumen extraído proviene generalmente de la aportación de acuitardos y del almacenamiento del acuífero. Cuando sistemáticamente después de hacer balances por algún tiempo (años), se obtiene que la mayor parte del volumen bombeado proviene del almacenamiento, se sabe que el acuífero está siendo minado o sobreexplotado y que eventualmente llegará el día en que no sea posible extraer más agua, ya sea porque es antieconómico, porque se ha producido contaminación con agua salina (por ejemplo por un incremento importante de la aportación de un acuífardo con agua salina) o por algún otro efecto del abatimiento. Si no puede pararse la sobreexplotación por razones económicas, con el conocimiento anterior se está al menos en la posibilidad de estimar el momento del agotamiento del acuífero y tener para entonces fuentes alternativas de agua o el cambio de las actividades económicas de la región.

Normalmente, los estudios que se requieren para determinar el comportamiento del acuífero no pueden basarse sólo en la ecuación global del balance planteada arriba; es necesario ir a mayor detalle con los llamados modelos matemáticos distribuidos del acuífero. Estos están basados, sin embargo, en la aplicación de la misma ecuación anterior en áreas pequeñas del acuífero interconectadas entre sí.



En cualquier caso, para poder determinar los términos del balance es indispensable disponer de una gran cantidad de información de campo. De ella, la de mayor importancia es la proporcionada por las pruebas de bombeo, la de evoluciones piezométricas antes de y durante la explotación y la evolución y distribución del bombeo durante la explotación. Esto significa que además de las observaciones iniciales obtenidas al perforar los pozos, la planeación de la explotación de un acuífero necesita de un esfuerzo continuo de medición de niveles en pozos piloto, varias veces al año y la instalación de medidores de volumen en los pozos de bombeo. Esta información es la base para alimentar y calibrar los modelos matemáticos que pueden prever el comportamiento futuro del acuífero y permitir su explotación racional, ya sea como fuente renovable o no renovable.





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



PERFORACION DE POZOS PARA AGUA

EVALUACION

- . Pruebas de Bombeo
- . Transmisibilidad
- . Almacenamiento
- . Cuantificación

OCTUBRE, 1980



HIDRAULICA DE POZOS

La Hidráulica de Pozos es una de las materias más importantes de la Hidrología Subterránea, ya que proporciona las bases teóricas para interpretar o prever las fluctuaciones de los niveles freáticos o piezométricos, provocados por la extracción de agua mediante pozos.

I.- PROBLEMAS COMUNES.

Los problemas que estudia la Hidráulica de Pozos son muy diversos; entre los más comunes se encuentran los siguientes:

- a).- Identificación de sistemas de flujo y de terminación de sus características hidráulicas.

La identificación del sistema de flujo de que se trata (confinado, semiconfinado, con fronteras impermeables o de alimentación, etc.) y la de terminación de sus características hidráulicas (coeficientes de permeabilidad, transmisibilidad, almacenamiento, etc.), son esenciales para estudiar el comportamiento de un acuífero. Tal conocimiento es indispensable, en problemas de carácter local, para prever el comportamiento de los niveles de agua bajo diferentes regímenes de bombeo de uno o varios pozos; en problemas de carácter regional, como por ejemplo la cuantificación del volumen aprovechable de un acuífero, el conocimiento de las características hidráulicas es esencial para calcular los caudales de agua que circulan en el subsuelo y las variaciones del almacenamiento subterráneo, así como para desarrollar modelos de simulación de acuíferos.

- b).- Predicción del comportamiento de los niveles de agua.

Conocidas las características hidráulicas del acuífero, mediante las fórmulas de la Hidráulica de Pozos es posible predecir los abatimientos que se provocarían bajo ciertas condiciones de bombeo. Así, por ejemplo; si se trata del diseño de un pozo, pueden calcularse los abati-



mientos que se van a provocar en el propio pozo por la extracción del caudal requerido; así mismo, es posible conocer de antemano los abatimientos que se van a provocar en captaciones cercanas a la considerada, o en qué medida se van a provocar en captaciones cercanas a la considerada, o en qué medida se van a interferir varios pozos entre sí.

c).- Diseño de campos de pozos.

El problema consiste en definir el número, distribución (espaciamiento y arreglo) y régimen de operación (caudal y tiempo de bombeo) convenientes, de los pozos necesarios para la extracción de un caudal total.

d).- Definición del régimen de operación de pozos, dada una restricción en el abatimiento de los niveles.

Específicamente, en un acuífero costero el problema puede ser la definición de un régimen de bombeo de uno o varios pozos, tal que los niveles freáticos o piezométricos no desciendan abajo de un nivel crítico, impuesto por el riesgo de contaminación salina.

e).- Drenaje vertical.

En terrenos agrícolas los niveles freáticos someros constituyen un problema por afectar los sistemas radiculares de los cultivos o propiciar la salinización del suelo; en áreas urbanas, dicha condición obstaculiza la construcción de cimentaciones. En ocasiones, la geología subterránea es tal que los drenes verticales (pozos) resultan más eficientes que los horizontales. En ese caso, la Hidráulica de Pozos aporta las herramientas teóricas para diseñar el sistema de drenaje.

f).- Recarga artificial.

Uno de los métodos utilizados para recargar un acuífero consiste en la inyección de agua a través de pozos. Conocidas las características del sistema acuífero, puede deducirse la capacidad de absorción de uno o varios pozos y predecirse la respuesta de los niveles a la recarga.

II.- PRUEBAS DE BOMBEO.



2.1.- GENERALIDADES.

El conocimiento de las características físicas e hidráulicas del sistema acuífero es básico para el estudio de los problemas señalados.

Generalmente, un buen corte geológico derivado de la clasificación de las muestras de los materiales atravesados durante la perforación, proporciona una idea del tipo de sistema de que se trata. De la correlación de la litología de los materiales con los rangos de permeabilidad correspondientes, puede deducirse la transmisibilidad del acuífero; lógicamente, el valor así obtenido es sólo aproximado, ya que durante la perforación y el muestreo se alteran las condiciones que tiene el material in situ, especialmente por lo que se refiere al acomodo y grado de compactación, factores que tienen gran influencia en la permeabilidad.

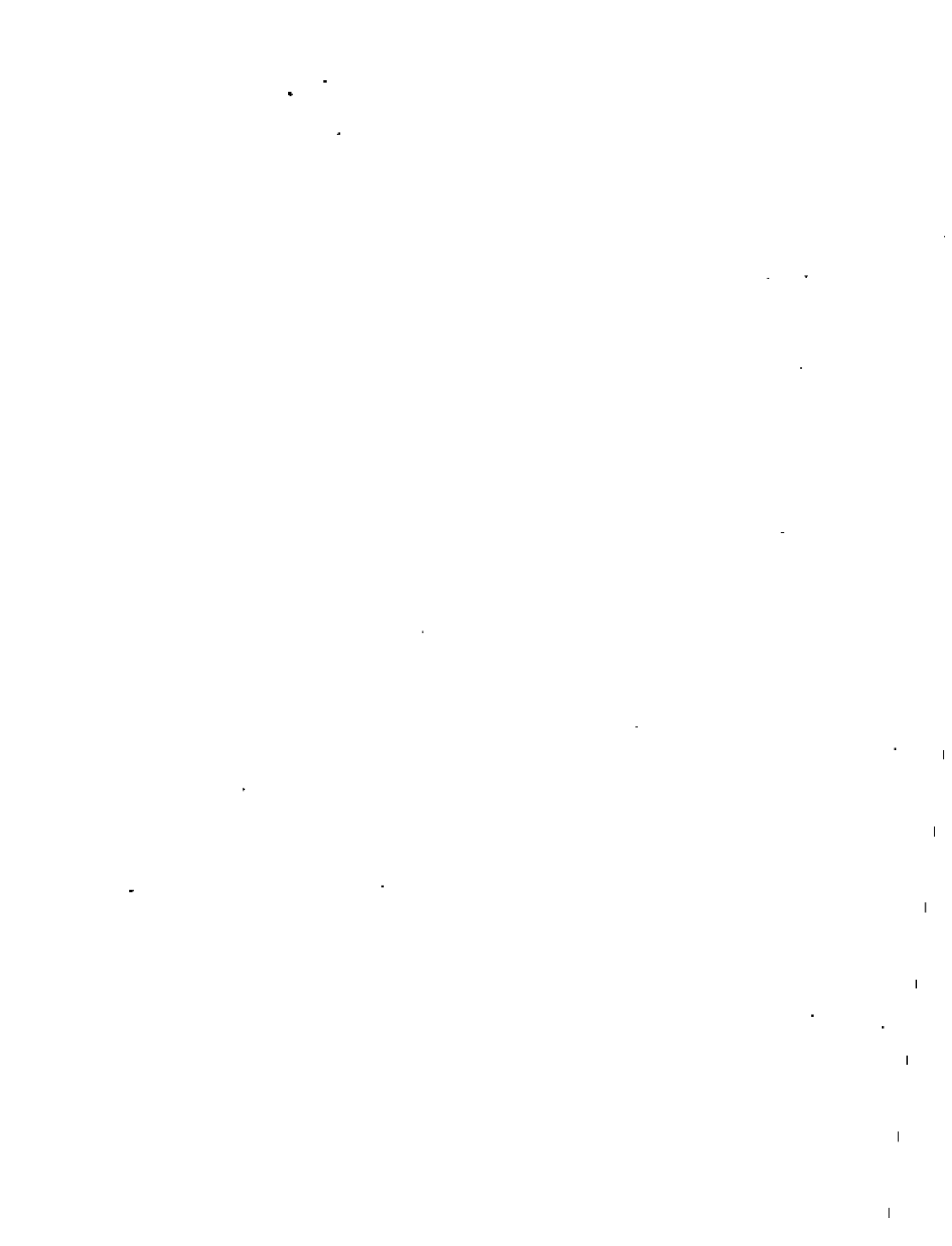
2.2.- OBJETIVOS DE LA PRUEBA.

Sin embargo, la transmisibilidad deducida en esta forma es prácticamente puntual, y la respuesta de los niveles al bombeo depende más bien de la transmisibilidad media de la porción de acuífero afectada por el mismo. Por otra parte, dicha respuesta no sólo es función de la transmisibilidad, sino también de otras propiedades hidráulicas y de las condiciones de frontera particulares del sistema de que se trata. Es necesario, pues, efectuar una prueba que dé una idea del tipo de sistema, y proporcione valores de las características hidráulicas del acuífero en el área de influencia del bombeo. Tales son los objetivos de la llamada "prueba de bombeo".

La prueba consiste en observar los efectos provocados en la superficie freática o piezométrica de un acuifero por la extracción de un caudal conocido. Los efectos (abatimientos) son registrados en el pozo de bombeo y en pozos próximos a él.

2.3.- SELECCION DEL SITIO DE PRUEBA.

En ocasiones, el sitio de la prueba está obligado; por ejemplo, cuando se trata de un problema de carácter local o interesa conocer las características hidráulicas del acuífero en un sitio específico.



En estudios geohidrológicos de carácter regional, generalmente hay cierta flexibilidad para elegir el sitio de prueba. Habiendo disponibilidad presupuestal para construir pozos con este fin, la prueba puede llevarse a cabo en el sitio que más convenga; aunque lo más frecuente es que tengan que utilizarse pozos ya existentes. Si en el área de interés hay varios pozos utilizables para el propósito de que se trata, en la elección del más adecuado deben considerarse los aspectos siguientes:

- que el equipo de bombeo se encuentre en condiciones apropiadas para sostener un caudal constante durante la prueba.
- que la profundidad al nivel del agua sea fácilmente medible.
- que el caudal de extracción pueda ser fácilmente aforado.
- que el agua bombeada no se infiltre hasta el acuífero en las proximidades del pozo.
- que las características constructivas y el corte geológico del pozo sean conocidos, y
- que los pozos próximos no operen durante la prueba.

Puesto que no es fácil que se cumplan simultáneamente todos estos requisitos, en cada caso deberá juzgarse con cierto criterio, si el incumplimiento de uno o varios de ellos obstaculiza significativamente o no, el buen desarrollo y la interpretación de la prueba.

2.4.- POZOS DE OBSERVACION.

Para la interpretación completa de una prueba, lo ideal es contar con uno o varios pozos de observación -- dispuestos a diferentes distancias del pozo de bombeo. Cuando esto es posible las características deducidas son más -- confiables y representativas de un área mayor. Por ello, -- es muy recomendable disponer al menos de un pozo de observación.

Ubicación de los Pozos de Observación.

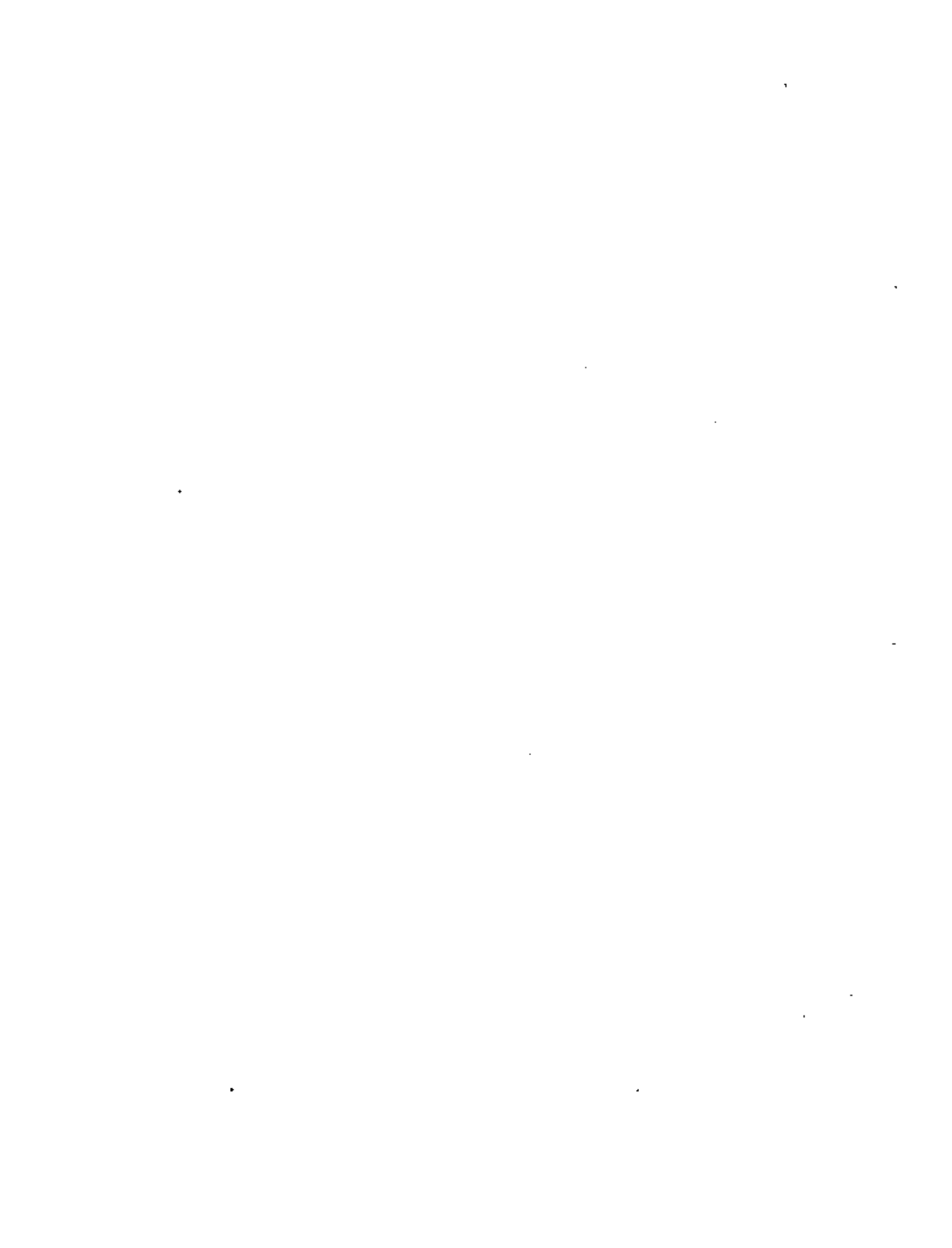
De gran importancia es la adecuada ubicación de los pozos de observación con respecto al de bombeo. No hay una regla fija que indique la distancia a que deben situarse, ya que ésta depende de las condiciones locales particulares de cada caso. En términos generales, el emplazamiento de los pozos de observación a distancias entre 30 y 100 m del pozo de bombeo, es adecuado en la mayoría de los casos; aunque para una ubicación más cuidadosa deben contemplarse los aspectos siguientes: el tipo y la transmisibilidad del acuífero, el caudal de descarga, la ubicación y longitud del cedazo del pozo de bombeo.

En acuíferos confinados la propagación de los efectos del bombeo es muy rápida y, por tanto, los abatimientos pueden ser medibles a distancias hasta de varios cientos de metros, incluso para tiempos cortos de bombeo. Por esta razón, en este tipo de acuíferos los pozos de observación pueden situarse bastante alejados del pozo de prueba. En cambio, en los acuíferos freáticos la propagación de los abatimientos es mucho más lenta; por consiguiente, los pozos de observación deben situarse más próximos al de bombeo, a fin de que los abatimientos sean medibles sin prolongar demasiado la prueba.

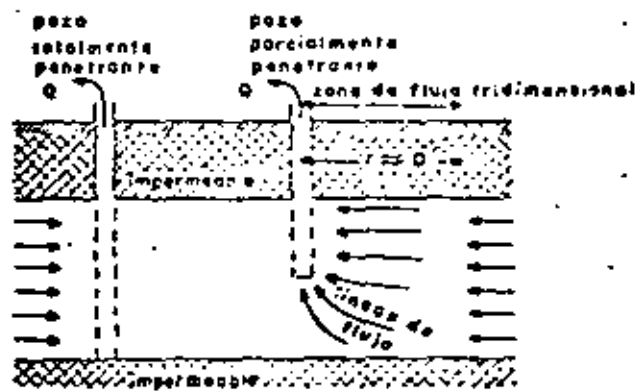
Mientras mayor es la transmisibilidad de un acuífero más extenso es el cono de abatimientos. Entonces, en un acuífero de alta transmisibilidad los pozos de observación pueden situarse más alejados del pozo de bombeo, que en un acuífero de transmisibilidad baja.

La magnitud de los abatimientos es directamente proporcional al caudal bombeado. Si éste es pequeño, los abatimientos provocados en pozos de observación relativamente alejados pueden no ser medibles, aun cuando la influencia del bombeo ya se haya extendido hasta ellos. Por tanto, mientras más bajo sea el caudal extraído, más próximos deben situarse los pozos de observación.

Cuando el cedazo del pozo de bombeo capta la mayor parte del espesor del acuífero, el flujo es predominantemente lateral. En este caso, los pozos de observación registran el mismo abatimiento independientemente de la posición y de la ubicación de su cedazo. Por el contrario, si el cedazo



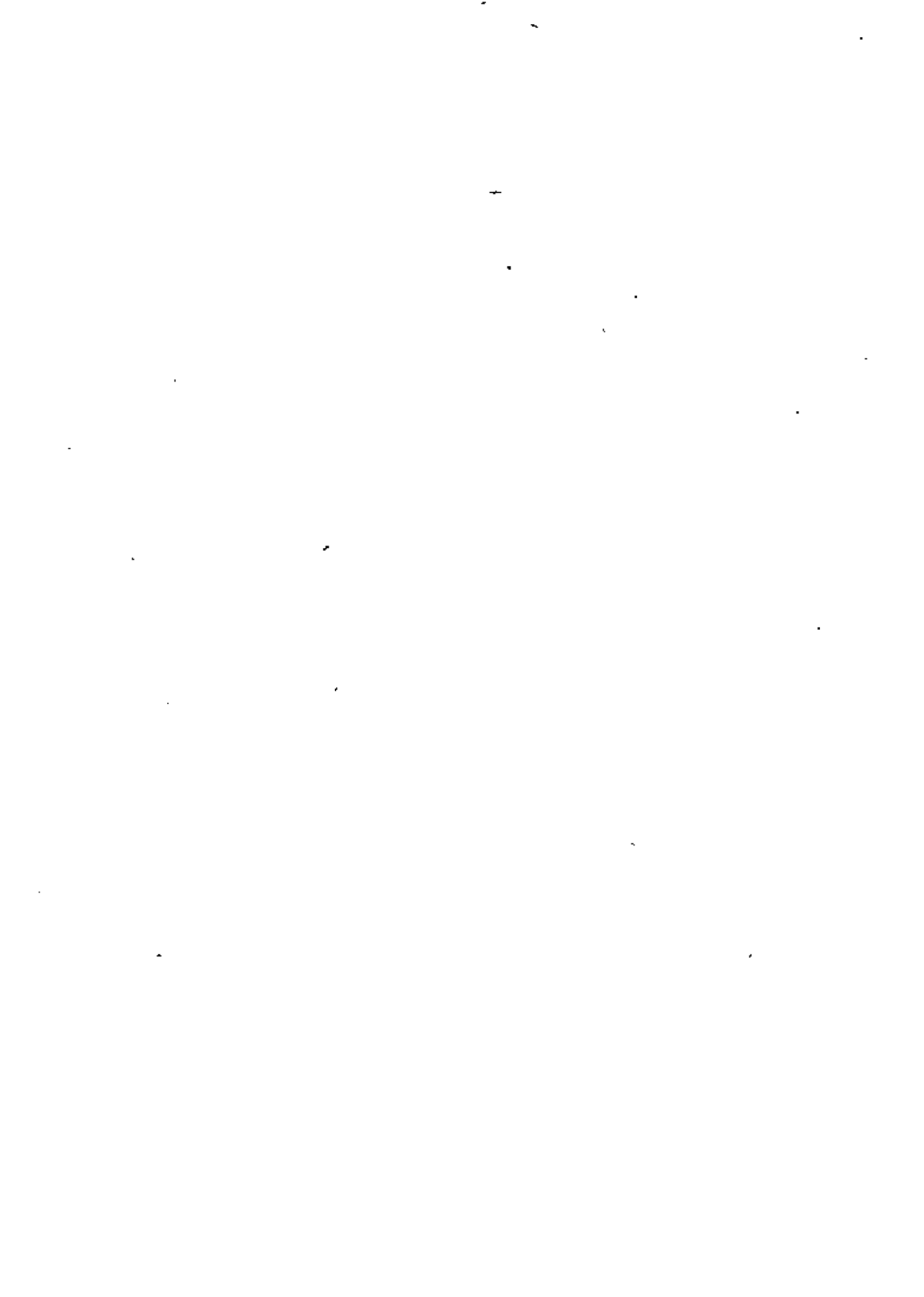
del pozo bombeado capta sólo una parte del espesor del acuífero, la distribución vertical de los abatimientos no es uniforme, debido a que el flujo es tridimensional en las proximidades del pozo; como consecuencia, los abatimientos registrados en un pozo de observación dependen de la ubicación y longitud de su cedazo, y la interpretación de la prueba resulta bastante más complicada. Por esta razón, en tal caso es preferible emplazar los pozos de observación a distancias mayores de 1.5 veces el espesor del acuífero, para las cuales el flujo es prácticamente horizontal.



Profundidad de los Pozos de Observación.-

Tan importante como su ubicación con respecto al pozo de bombeo, es la adecuada profundidad de los pozos de observación. Naturalmente, debe cuidarse que estos capturen el mismo acuífero que está siendo bombeado. Cuando el pozo de bombeo capta la mayor parte del espesor del acuífero, y éste es más o menos homogéneo, no es necesario que los pozos de observación penetren totalmente al acuífero, siendo suficiente un cedazo de longitud reducida, de preferencia ubicado a la profundidad en que se encuentra la parte media del cedazo del pozo de bombeo.

Sin embargo, si el acuífero tiene intercalaciones de materiales arcillosos, es conveniente que el cedazo de los pozos de observación sea de mayor longitud o, todavía mejor, que se construyan pozos de observación que capturen cada estrato permeable, con el propósito de definir la intercon-



xión entre ellos. Así mismo, cuando se trata de acuíferos se miconfinados, es conveniente instalar también pozos de observación en el estrato semiconfinante, con el objeto de registrar los abatimientos provocados en él, lo que permite un conocimiento más preciso de su permeabilidad vertical.

Limitaciones.-

Obviamente, el empleo de pozos de observación enfrenta una gran dificultad: su construcción en la mayoría de los casos no es viable por limitaciones económicas. Por otra parte, aun cuando dichas limitaciones no sean muy serias, es frecuente que no se aprecie lo suficiente la utilidad de una prueba confiable, y que la construcción de los pozos "testigo" se considere un gasto inútil.

Al respecto, cabe aclarar que el costo de tales pozos no es muy significativo, ya que su diámetro puede ser muy reducido y, por lo general, no se requiere que penetren totalmente al acuífero; por el otro lado, el mejor conocimiento del tipo de sistema y de sus características hidráulicas, que se logra cuando se dispone de ellas, es invaluable en el estudio de diversos problemas de agua subterránea.

Cuando no se dispone de medios económicos para construirlos, pero se tiene cierta libertad para elegir el emplazamiento del pozo de bombeo, éste puede ubicarse en las proximidades de pozos existentes para utilizarlos en la prueba, siempre y cuando las características de ellos sean adecuadas para tal fin. Lo más común, sin embargo, es que no se disponga de pozos de observación, y que la prueba se limite a observar los abatimientos en el pozo de bombeo. Debido a que en su interior y en su vecindad inmediata se presentan efectos locales complejos, difíciles de tomar en cuenta en las soluciones teóricas (concentraciones de flujo; influencia del filtro de grava; pérdidas por entrada, fluctuaciones, cambios de dirección; turbulencias . . .), la interpretación de las pruebas en este caso es aún muy dudosa y, por lo mismo, los resultados de ella deben tomarse con ciertas reservas.

2.5.- DURACION DE LA PRUEBA.

La duración recomendable de una prueba de bombeo depende de las características del sistema acuífero estudiado y de la precisión con que se desea conocer sus características hidráulicas; desde luego, en la práctica está sujeta a la



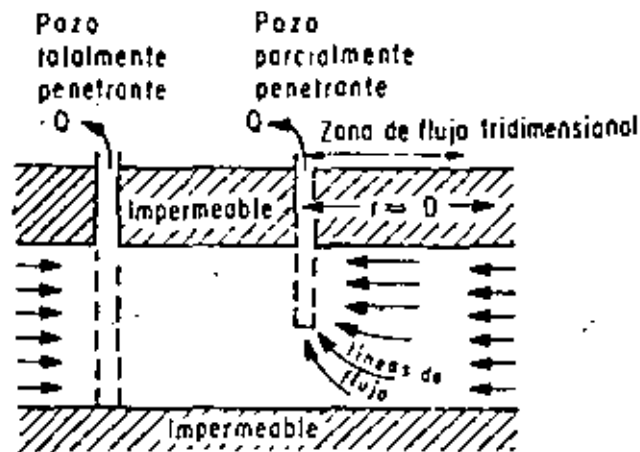


FIGURA No. 1.- ESQUEMA DEL FLUJO HACIA POZOS TOTAL Y PARCIALMENTE PENETRANTES.

disponibilidad de los pozos (cuando se utilizan pozos particulares) y a limitaciones económicas. Una prueba de larga duración tiene varias ventajas: las características deducidas de su interpretación son representativas de una área mayor, ya que los efectos del bombeo se propagan a mayor distancia; en ocasiones, revela la presencia de frentes laterales; en algunos casos, se alcanza la estabilización del cono de abatimiento, facilitando la interpretación de la prueba.

La duración recomendable varía entre varias - - horas y varios días, siendo conveniente prolongarla tanto como sea posible, sobre todo cuando se cuenta con pozos de observación; en caso contrario, no se justifica realizar pruebas largas y, en general, son suficientes unas cuantas horas de bombeo. En todo caso, el graficado en el sitio de prueba, del comportamiento de los niveles del agua proporciona elementos de juicio para continuar o suspender la prueba, como se indica más adelante.

Para verificar los resultados deducidos mediante la llamada "etapa de bombeo" ó "etapa de abatimiento", se lleva a cabo la llamada "etapa de recuperación", que consiste en observar el comportamiento de los niveles al suspender el bombeo durante un cierto tiempo; la duración de esta etapa es, generalmente, semejante a la de la etapa anterior.

2.6.- EJECUCION DE LA PRUEBA.

Antes de iniciar la prueba, se revisará el equipo a utilizar (cronómetros, sondas, cintas métricas, escuadra para aforo, etc.), para verificar su correcto funcionamiento. El cable de las sondas deberá ser previamente calibrado. Cuando se cuente con varias sondas, se procurará, en lo posible, que todas las observaciones en un pozo se efectúen con la misma sonda.

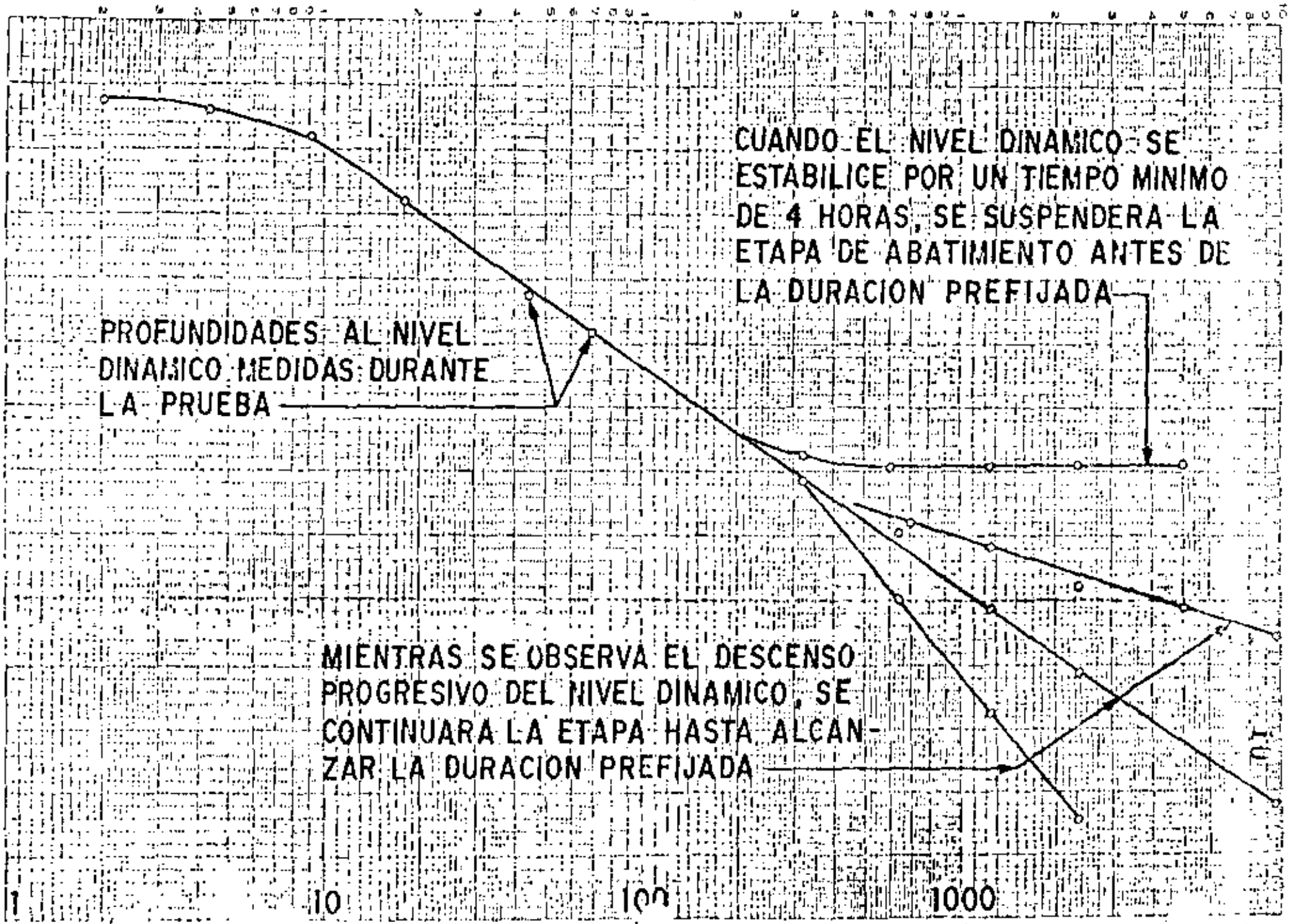
Seguidamente, se llevarán a cabo las actividades siguientes:

a).- Inmediatamente antes de iniciar el bombeo, se medirá la profundidad al nivel estático en el pozo de bombeo y en el (o los) de observación. Se anotará la hora de iniciación de la prueba y las lecturas iniciales con el nombre de los pozos a que corresponden.



TIEMPO DE BOMBEO, EN MINUTOS

PROFUNDIDAD AL NIVEL DINAMICO, EN METROS



PROFUNDIDADES AL NIVEL DINAMICO MEDIDAS DURANTE LA PRUEBA

CUANDO EL NIVEL DINAMICO SE ESTABILICE POR UN TIEMPO MINIMO DE 4 HORAS, SE SUSPENDERA LA ETAPA DE ABATIMIENTO ANTES DE LA DURACION PREFIJADA

MIENTRAS SE OBSERVA EL DESCENSO PROGRESIVO DEL NIVEL DINAMICO, SE CONTINUARA LA ETAPA HASTA ALCANZAR LA DURACION PREFIJADA



b).- Se iniciará el bombeo, procurando mantener un caudal constante, y se procederá a medir la profundidad al nivel del agua en el pozo de bombeo y en el (o los) de observación, con la secuela de tiempos que se indica a continuación:

LECTURA	TIEMPO A PARTIR DE LA INICIACION DEL BOMBEO
1	Inmediatamente antes de iniciar el bombeo.
2	15 Segundos
3	30 Segundos
4	1 Minuto
5	2 Minutos
6	4 Minutos
7	8 Minutos
8	15 Minutos
9	30 Minutos
10	1 Hora
11	2 Horas
12	4 Horas
13	8 Horas
14	16 Horas
15	24 Horas
16	32 Horas
17	40 Horas
18	48 Horas

c).- A intervalos de tiempo seleccionados, se harán las observaciones o lecturas necesarias para cuantificar el caudal de bombeo.

d).- Con las observaciones realizadas, se - - construirá, en el sitio de prueba, la gráfica de variación del nivel dinámico en el tiempo, para el pozo de bombeo y - para cada uno de los pozos de observación. En la graficación podrá utilizarse papel con trazado aritmético o semilogarítmico (los tiempos se llevarán en la escala logarítmica). Estas gráficas son útiles para juzgar el correcto desarrollo de la prueba: permiten detectar errores de medición, variaciones sensibles de caudal y otras anomalías causadas por factores externos, y constituyen un elemento de juicio para continuar o suspender una prueba.



NOMOGRAMA PARA CALCULAR EL GASTO A TRAVÉS DE UN TUBO

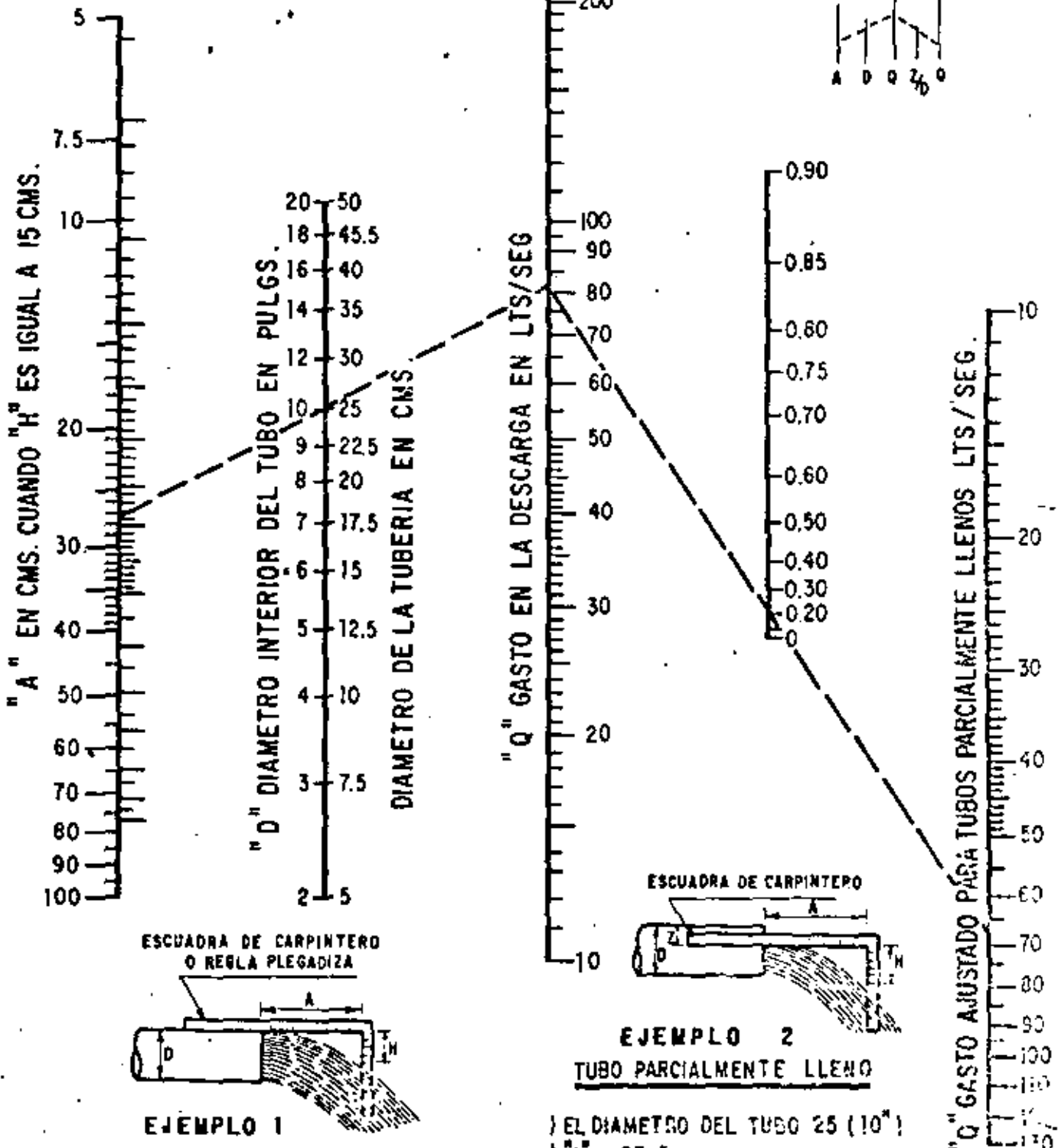
FORMULA RESUELTA

$$Q = 0.0174 \frac{A D^2}{\sqrt{H}}$$

D, H, A, EN CM.
Q EN LPS

12

SOLUCION



EJEMPLO 1
TUBO LLENO

- } EL DIAMETRO DEL TUBO 25 (10")
- } "A" = 27.5 cm.
- } "H" = 15 cm.
- } "Q" = 81 LPS / SEG



EJEMPLO 2
TUBO PARCIALMENTE LLENO

- } EL DIAMETRO DEL TUBO 25 (10")
- } "A" = 27.5 cm.
- } "H" = 15 cm.
- } "Z" = 5 cm.
- } $Z/D = \frac{\text{FALTANTE}}{\text{DIAMETRO}} = \frac{5}{25} = \frac{1}{5} = 0.20$

"Q" GASTO AJUSTADO PARA TUBOS PARCIALMENTE LLENOS LPS / SEG.

VALORES DEL COEFICIENTE
DE
DESCARGA K' EN TUBERIAS

DIAMETRO DE ORIFICIO (")	DIAMETRO DE DESCARGA EN PULGADAS							
	3	4	5	6	7	8	10	12
2	0.539	0.453	0.552	0.593				
2 1/4	0.592	0.950	0.715	0.705	0.597			
2 1/2	1.243	0.973	0.901	0.881	0.870	0.859		
2 3/4		1.256	1.117	1.074	1.057	1.045		
3		1.862	1.355	1.298	1.276	1.253	1.231	
3 1/4		2.406	1.656	1.553	1.503	1.452	1.431	
3 1/2			2.014	1.845	1.757	1.735	1.705	
3 3/4			2.305	2.155	2.061	2.005	1.953	1.939
4			3.097	2.846	2.737	2.701	2.616	2.590
4 1/4				2.979	2.739	2.643	2.553	2.513
4 1/2				3.575	3.172	3.021	2.890	2.830
4 3/4				4.205	3.615	3.420	3.210	3.162
5				4.973	4.177	3.951	3.703	3.631
5 1/4					4.852	4.320	4.034	3.931
5 1/2					5.259	4.810	4.473	4.331
5 3/4					5.572	5.214	4.931	4.750
6						6.355	5.979	5.693
6 1/4						7.280	6.819	6.497
6 1/2						8.299	7.790	7.413
6 3/4							8.903	8.471
7							9.642	9.153
7 1/4							10.413	9.863
7 1/2							11.213	10.613
7 3/4							12.047	11.403
8							12.913	12.213
8 1/4							13.813	13.043
8 1/2							14.743	13.913
8 3/4							15.703	14.813
9							16.693	15.743
9 1/4							17.713	16.703
9 1/2							18.763	17.693
9 3/4							19.843	18.713
10							20.953	19.763

$$Q = K' \sqrt{h}$$

Q en lps

h en cm.

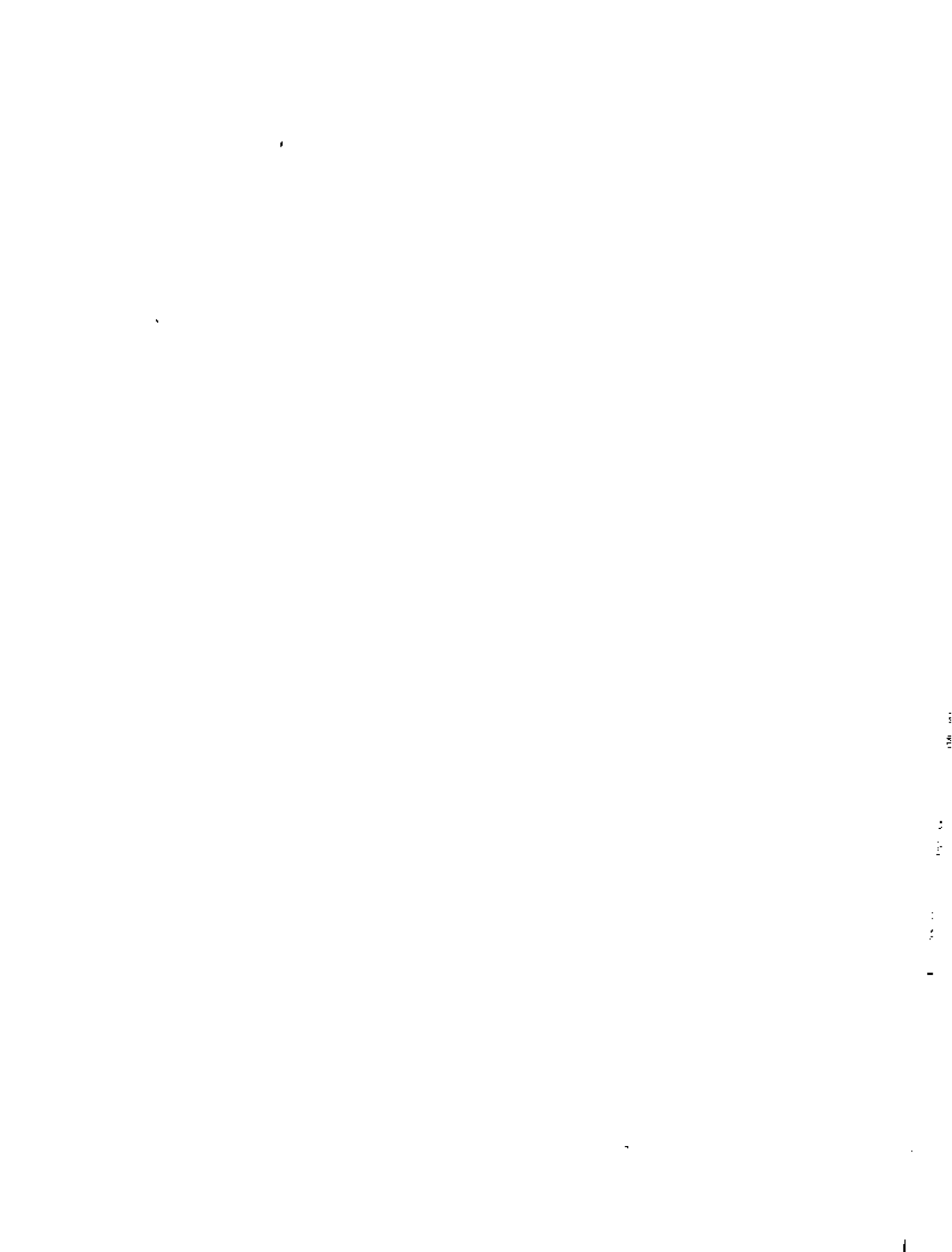
e).- La duración de la etapa de bombeo, fijada inicialmente como se indicó en (2.5) podrá modificarse con el criterio siguiente:

- Si el caudal de bombeo varía apreciablemente, en forma continua e incontrolable, se suspenderá la prueba.
- Cuando en la gráfica nivel dinámico-tiempo, - del pozo bombeado (en trazado semi-logarítmico o aritmético) se observe una estabilización del nivel dinámico por un tiempo mínimo de 4 hs, podrá suspenderse la etapa de bombeo antes de alcanzar la duración prefijada, (ver gráfica anexa).

f).- Una vez concluida la etapa de bombeo, se iniciará la de recuperación, en la que se efectuarán observaciones en los tiempos indicados a continuación:

LECTURA	TIEMPO A PARTIR DE LA SUSPENSION DEL BOMBEO
1	Inmediatamente antes de suspender el bombeo.
2	15 Segundos
3	30 Segundos
4	1 Minuto
5	2 Minutos
6	4 Minutos
7	8 Minutos
8	15 Minutos
9	30 Minutos
10	1 Hora
11	2 Horas
12	4 Horas
13	8 Horas
14	16 Horas
15	24 Horas
16	32 Horas
17	40 Horas
18	48 Horas

g).- Los tiempos indicados en los incisos b) y f) son una guía de la frecuencia con la que deben realizarse las observaciones. Si, por cualquier causa, no puede hacer-



se contacto con el nivel dinámico en el tiempo señalado, se hará la medición y se indicará el tiempo real a que corresponde.

2.7.- COMENTARIOS GENERALES.

De todo lo expuesto se desprende que una prueba de bombeo requiere una cuidadosa programación e implica un cierto gasto más o menos significativo. Desde luego, la duración del bombeo y el número de pozos de observación recomendables en cada caso particular, depende del tipo de problema de que se trate. En muchos casos no se justifica una prueba larga, ni la construcción de pozos "testigo"; por ejemplo, cuando se trata de problemas de carácter muy local. En cambio, cuando se trata de problemas más complejos o de carácter regional, como el cálculo de la disponibilidad de agua subterránea de una zona, o el diseño de un campo de pozos o de un sistema de drenaje agrícola, se justifica plenamente el gasto que implica la ejecución de una prueba completa, ya que un conocimiento insuficiente o equivocado de las características del sistema, se puede traducir en graves perjuicios económicos.

III.- ANALISIS DE LAS PRUEBAS.

La interpretación de las pruebas de bombeo en acuíferos granulares, se basa en soluciones teóricas deducidas resolviendo la ecuación diferencial de flujo, para las condiciones de frontera representativas de diversos sistemas. Dichas soluciones expresan matemáticamente el comportamiento de los niveles piezométricos en el área estudiada por el bombeo.

Al realizar una prueba, la gráfica de las observaciones sugiere el tipo de sistema de que se trata. Mediante consideraciones geológicas, hidrológicas y topográficas, basadas en la información complementaria disponible (datos geológicos, registros eléctricos, geología superficial, presencia de canales o ríos, pendiente topográfica, etc.), se confirma, modifica o descarta la suposición hecha inicialmente. Una vez identificado el sistema, a partir de las ecuaciones correspondientes pueden deducirse las características hidráulicas buscadas.

Naturalmente, para que el problema sea atacable analíticamente, es necesario simplificar los sistemas conside

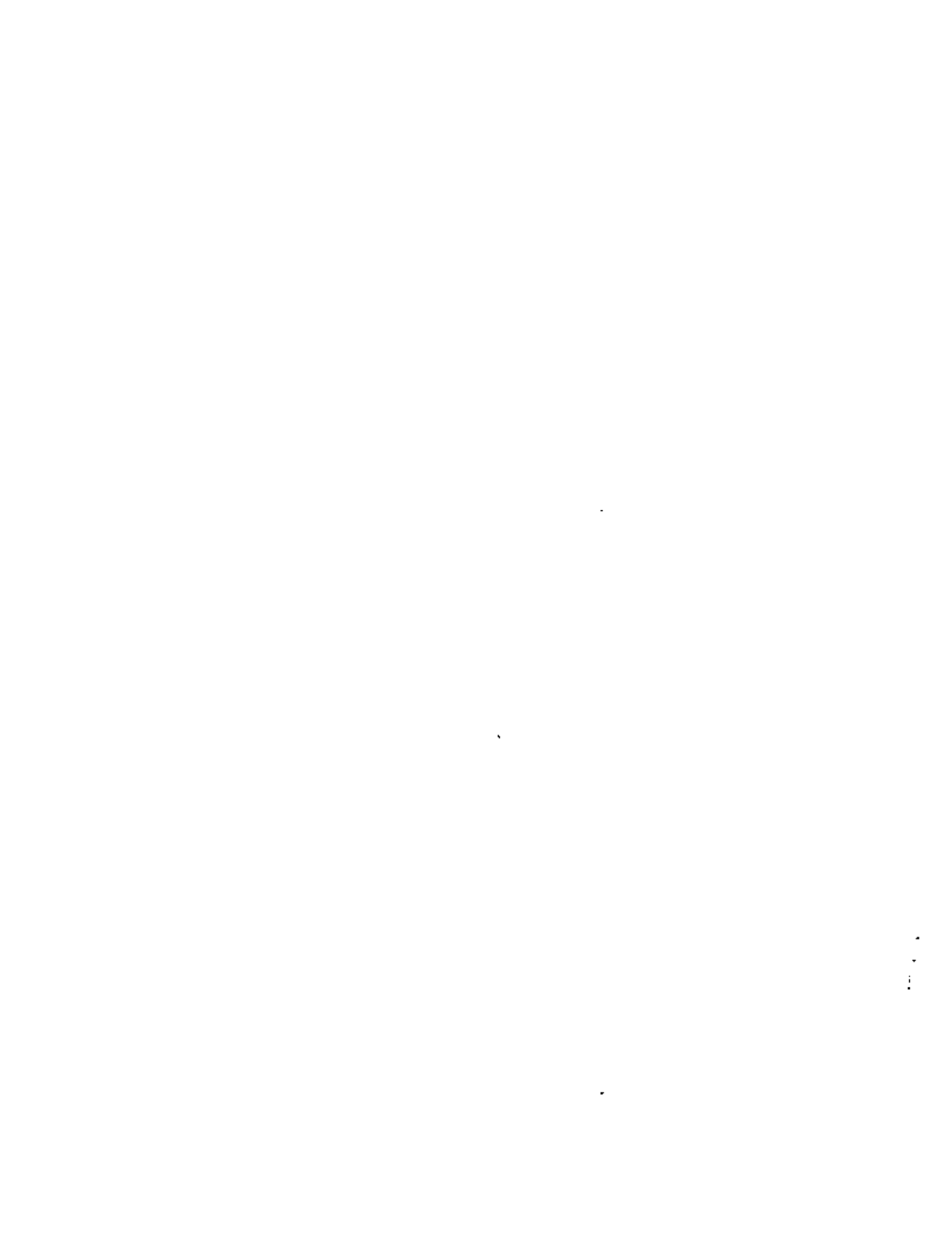
rados, introduciendo algunas hipótesis. Las más comunes son:—

- el acuífero tiene extensión lateral infinita.
- el acuífero es homogéneo, isótropo y de espesor uniforme en el área afectada por el bombeo.
- la superficie piezométrica o la superficie freática, según el caso, es aproximadamente horizontal en el área de influencia del bombeo, antes de iniciarse la prueba.
- el caudal de descarga es constante.
- el pozo capta totalmente el espesor del acuífero.

Aparentemente, estas hipótesis limitan seriamente la aplicabilidad de las soluciones a casos reales; sin embargo, no deben considerarse en forma rigurosa sino con un enfoque práctico. Es claro que las condiciones naturales — siempre diferirán en cierta medida de las condiciones teóricas; pero en muchos casos tales desviaciones no son significativas desde el punto de vista práctico.

Conviene aclarar, sobre todo, que las hipótesis señaladas deben cumplirse, exclusivamente, en el área afectada por el bombeo, la cual no es de extensión muy considerable. Este hecho hace a las hipótesis más "razonables". En efecto, las características hidráulicas y el espesor medio de un acuífero, generalmente no presentan variaciones importantes en el área comprendida por el cono de abatimientos; en condiciones naturales la superficie freática o la superficie piezométrica tienen gradientes muy pequeños, por lo que pueden suponerse prácticamente horizontales; en cuanto a la homogeneidad, la presencia de intercalaciones de materiales de litología y permeabilidad diferentes a las del acuífero, sólo afectan localmente la distribución de abatimientos, pero no influyen significativamente en el comportamiento de conjunto del acuífero.

Obviamente, cuando las condiciones reales se apartan notablemente de las establecidas en las hipótesis, las soluciones basadas en éstas dejan de ser aplicables, y es ne-



cesario utilizar otras soluciones cuyas hipótesis se ajusten razonablemente a la situación real.

3.1.- MECANISMO DEL FLUJO HACIA UN POZO.

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 hidráulicas y del tiempo de bombeo, entre otros factores.

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".

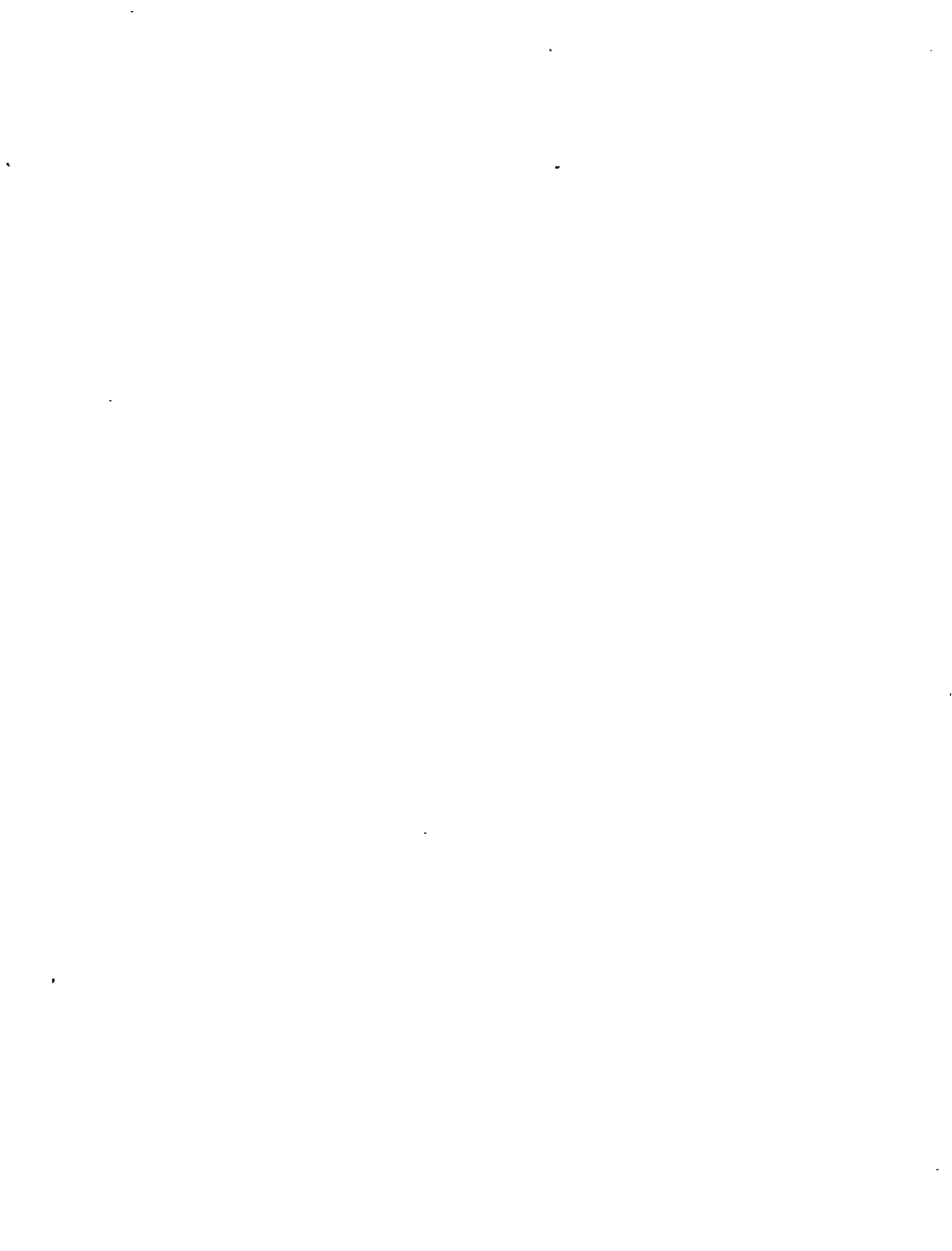
El agua bombeada por el pozo es tomada del almacenamiento del acuífero. Si no hay recarga vertical en el área afectada por el bombeo, la depresión piezométrica se va expandiendo afectando un área cada vez mayor. Al crecer el área afectada, los abatimientos necesarios para mantener la extracción del pozo 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.

3.2.- POZOS EN ACUIFEROS CONFINADOS.

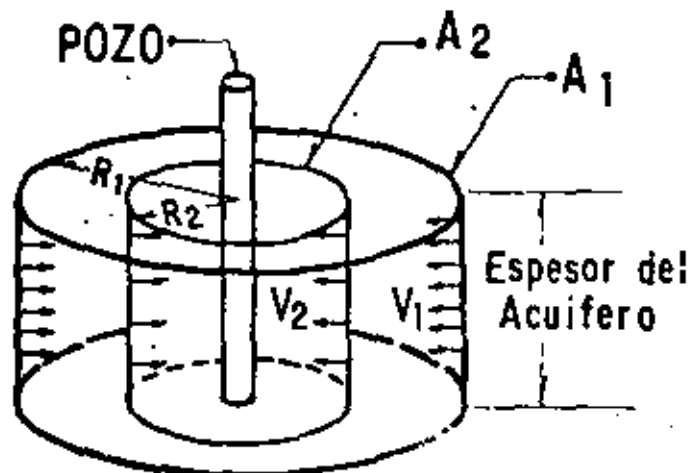
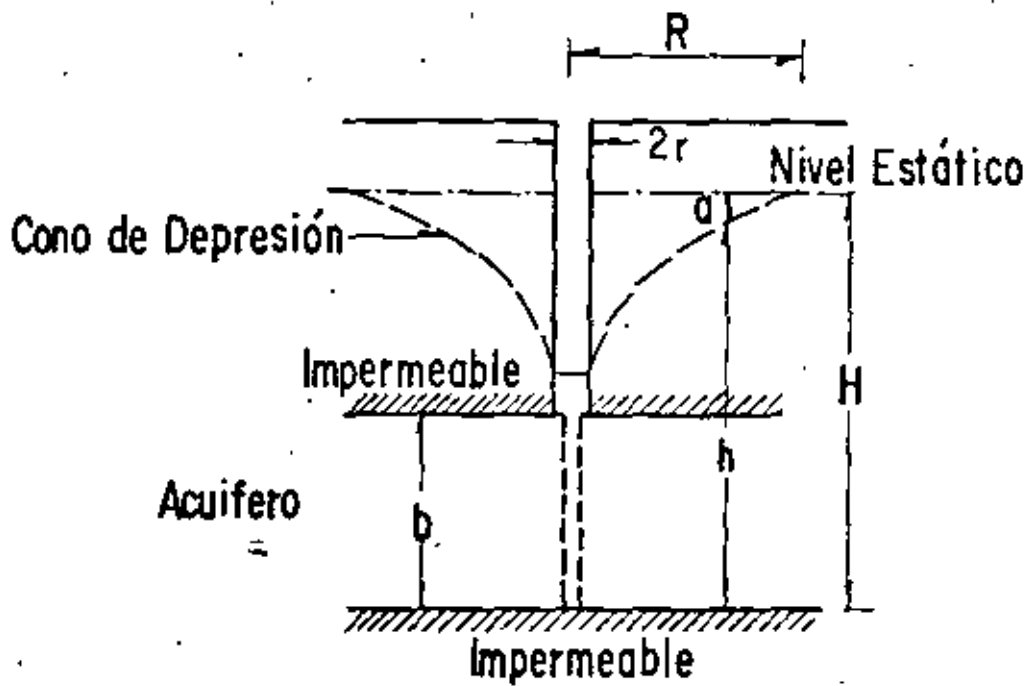
Pruebas en régimen de flujo establecido.-

Puede demostrarse que la solución de la ecuación diferencial

$$\frac{d^2h}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dh}{dr} = 0 \quad (1)$$



MECANISMO DEL FLUJO HACIA UN POZO

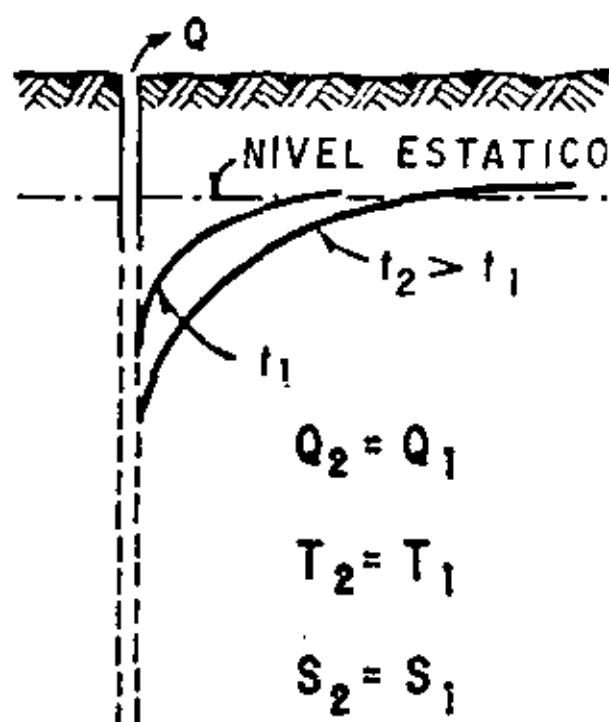
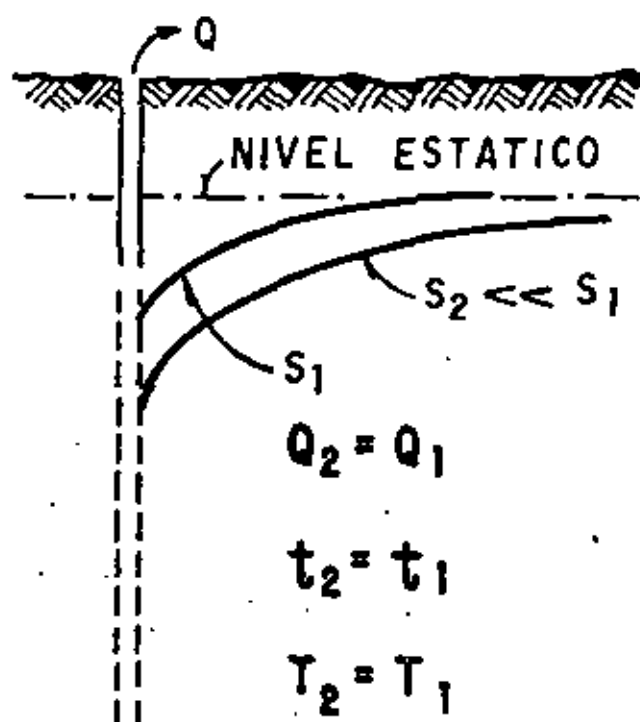
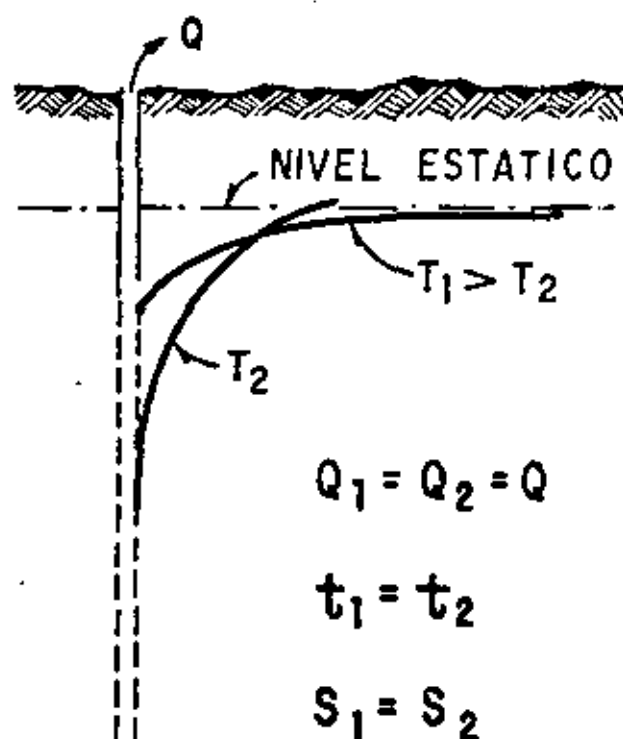
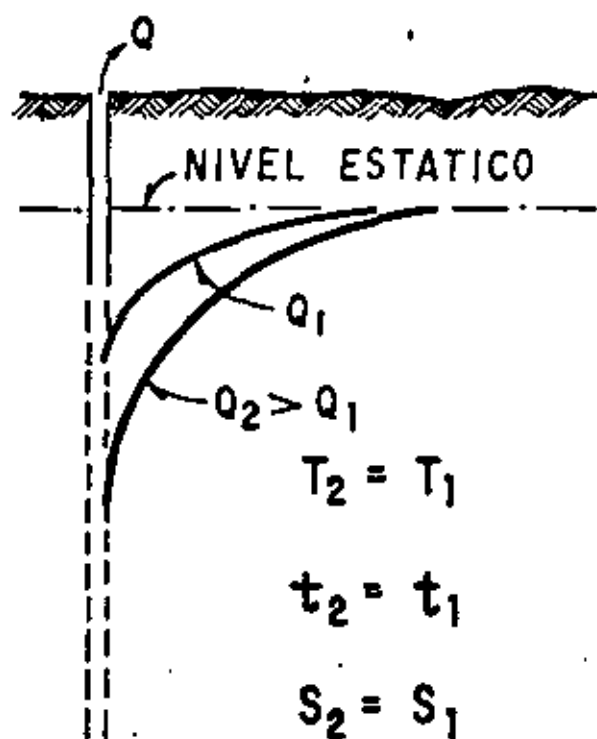


$$R_1 = 2 R_2 \quad A_1 = 2 A_2$$

$$V_2 = 2 V_1$$



FIG. C.— INFLUENCIA DEL CAUDAL (Q) TIEMPO DE BOMBEO (t), TRANSMISIBILIDAD (T), ALMACENAMIENTO (S), EN LA FORMA Y DIMENSIONES DEL CONO DE DEPRESION



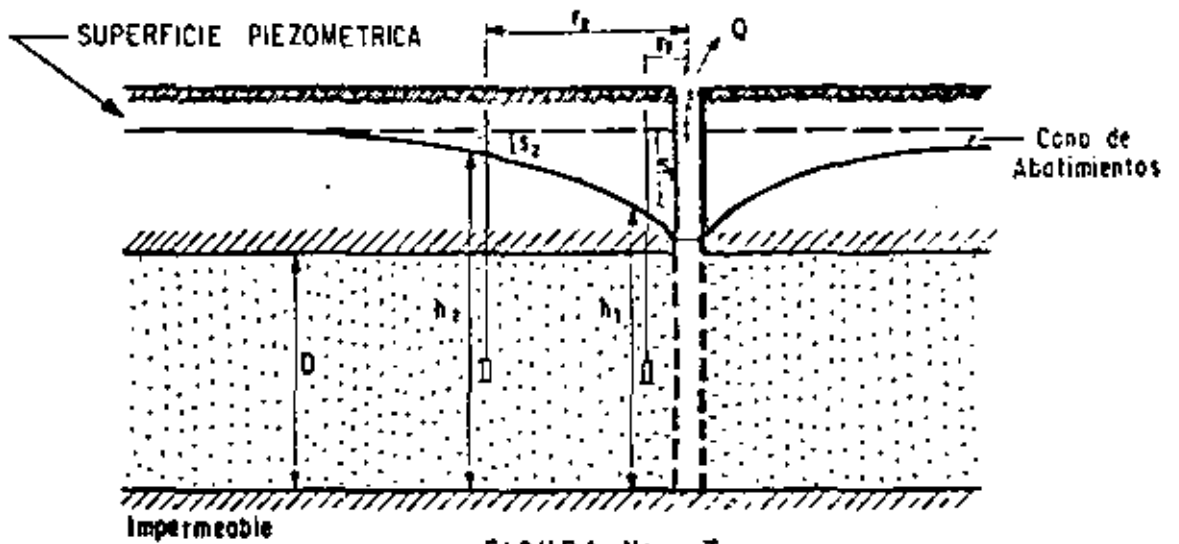


FIGURA No. 7



sujeta a las condiciones de frontera correspondientes al sistema ilustrado en la figura, es:

$$h_1 - h_2 = \frac{Q}{2 \pi K b} L \frac{r_1}{r_2} \quad (2)$$

en la que: h_1 y h_2 son las elevaciones del nivel del agua a las distancias r_1 y r_2 del pozo de bombeo, respectivamente; Q , el caudal bombeado; K , la permeabilidad del acuífero, y b , su espesor saturado. Esta solución se basa en la hipótesis de que el flujo hacia el pozo se encuentra establecido, y en todas las -- antes señaladas.

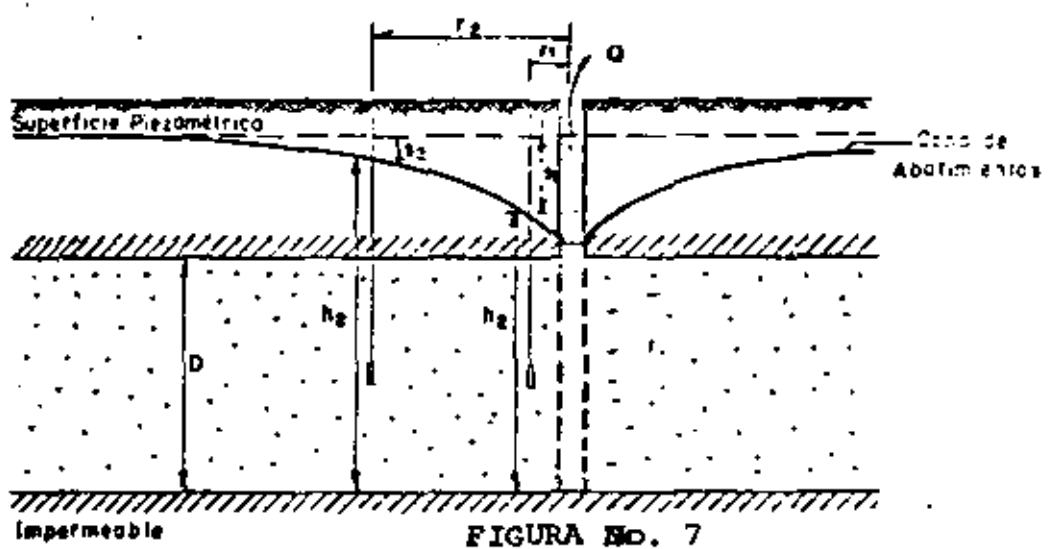


FIGURA No. 7

La expresión anterior, llamada "Fórmula de Thiem", permite calcular la permeabilidad cuando se conoce la posición del nivel del agua en dos pozos de observación:

$$K = \frac{Q}{2 \pi b (a_2 - a_1)} L \frac{r_1}{r_2} \quad (3)$$

Cuando sólo se dispone de un pozo de observación, la permeabilidad se deduce mediante la ecuación:

$$K = \frac{Q}{2 \pi b (a_p - a_1)} L \frac{r_1}{r_p} \quad (4)$$



HIPOTESIS BASICAS DE LA ECUACION DE THIEM

- a). - ACUIFERO HOMOGENEO E ISOTROPO EN EL AREA AFECTADA POR EL BOMBEO.
- b). - EL ESPESOR DEL ACUIFERO ES CONSTANTE (ACUIFERO - CONFINADO) O EL ESPESOR SATURADO INICIAL ES CONSTANTE ANTES DE INICIAR EL BOMBEO (ACUIFERO LIBRE).
- c). - EL POZO ES TOTALMENTE PENETRANTE.
- d). - LA SUPERFICIE PIEZOMETRICA O FREATICA ES HORIZONTAL ANTES DE INICIARSE EL BOMBEO.
- e). - EL ABATIMIENTO EN LAS PROXIMIDADES DEL POZO NO VARIARIA EN EL TIEMPO.

en la que r_p es el radio del pozo de bombeo, y a_p es el abatimiento registrado en el mismo. Esta expresión debe utilizarse con reservas, porque el abatimiento medido en el pozo está influenciado por las pérdidas locales en el pozo de bombeo.

Aun cuando las fórmulas anteriores son aplicables a algunos casos prácticos, tienen dos limitaciones principales: no proporcionan información respecto al coeficiente de almacenamiento, ni permiten calcular los abatimientos en función del tiempo.

Pruebas de bombeo en régimen transitorio.-

En 1935, C. V. Theis inició el estudio de la hidráulica de pozos en régimen transitorio, al desarrollar la fórmula que lleva su nombre. Mediante ella pueden deducirse los valores de los coeficientes de transmisibilidad y almacenamiento, a partir de los abatimientos registrados en uno o varios pozos de observación para diferentes tiempos de bombeo, con la ventaja de que no es necesario esperar la estabilización del cono de abatimientos, como en el caso anterior.

La solución desarrollada por Theis, es:

$$a = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (5)$$

donde: a es el abatimiento registrado a la distancia r del pozo de bombeo; Q , es el caudal; T , la transmisibilidad; $W(u)$, la función de pozo, y

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (6)$$

Con base en las expresiones (5) y (6), Theis desarrolló el método gráfico-numérico de solución para determinar los parámetros T y S , que a continuación se describe:

- a).- Trazar la curva tipo $W(u) - 1/u$ en papel con trazado doble logarítmico.
- b).- Construir la gráfica abatimiento-tiempo del pozo de observación en papel idéntico al utilizado en el inciso a).
- c).- Superponer las gráficas manteniendo los ejes paralelos, y buscar la coincidencia de la -



HIPOTESIS BÁSICAS DE LA ECUACION DE THEIS

- a).- EL ACUIFERO ES HOMOGENEO E ISOTROPO.
- b).- EL ESPESOR SATURADO DEL ACUIFERO ES CONSTANTE.
- c).- EL ACUIFERO TIENE EXTENSION LATERAL INFINITA.
- d).- EL CAUDAL BOMBEADO PROCEDE DEL ALMACENAMIENTO DEL ACUIFERO.
- e).- EL POZO ES TOTALMENTE PENETRANTE.
- f).- EL ACUIFERO LIBERA EL AGUA INSTANTANEAMENTE AL ABATIRSE LA SUPERFICIE PIEZOMETRICA.

curva de campo y curva tipo.

d).- Seleccionar un punto de ajuste y obtener sus coordenadas en los cuatro ejes.

e).- Substituir los valores de las coordenadas en las ecuaciones (5) y (6), despejando los valores de T y S.

En la figura se muestra la curva tipo; la figura ilustra la interpretación de una prueba de bombeo.

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, fué desarrollado por Jacob, quien observó -- que para tiempos largos ($t > 5Sr^2/T$), la ecuación (5) puede expresarse:

$$a = \frac{2.30 Q}{4 \pi T} \log \frac{2.25 Tt}{r^2 S}$$

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).

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

CURVA TIPO PARA INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO EN POZOS TOTALMENTE PENETRANTES EN ACUIFEROS CONFINANTES

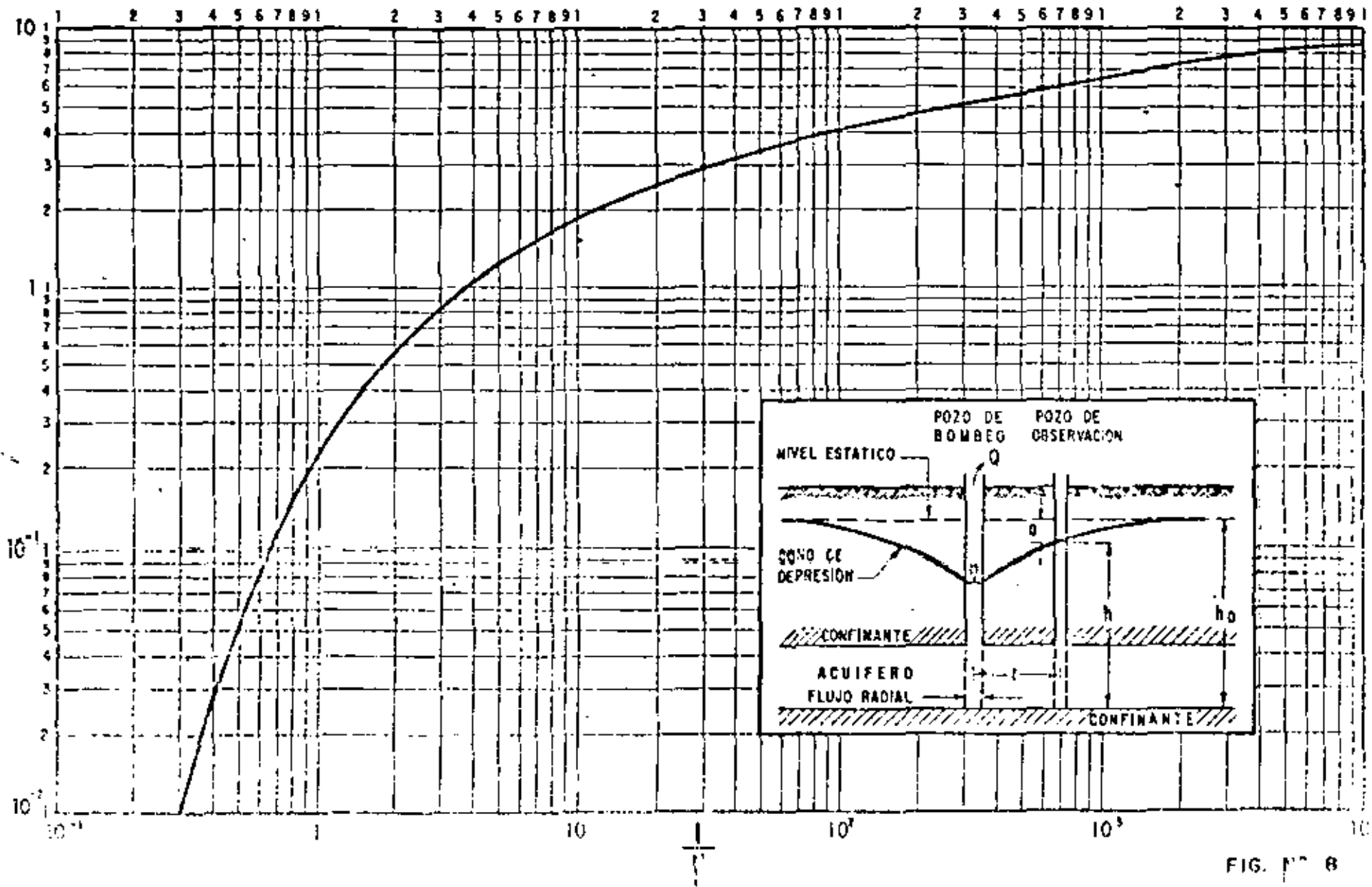


FIG. N° 8

.

.

.

de la recta, debido a que corresponden a tiempos cortos ($t < 5r^2S/T$) para los cuales no es válida la fórmula de Jacob.

- c).- Si la pendiente de la recta de ajuste es p la transmisibilidad puede obtenerse de la expresión:

$$T = \frac{0.183 Q}{p}$$

- d).- Determinar el valor de t , t_0 , para el cual la prolongación de la recta de ajuste intersecciona 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:

$$T = \frac{0.366 Q}{p}$$

$$S = \frac{2.25 T t}{r_0^2}$$

en que r_0 es el valor de r para el cual la prolongación de la recta de ajuste intersecciona 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 t/r^2 , y se sigue la secuela descrita anteriormente.

En la figura se compara la curva tipo de Theis con la aproximación de Jacob, en trazado semilogarítmico; en la figura se ejemplifica la aplicación del método.

1.

2.

3.

4.

5.

INTERPRETACION DE UNA PRUEBA DE BOMBEO

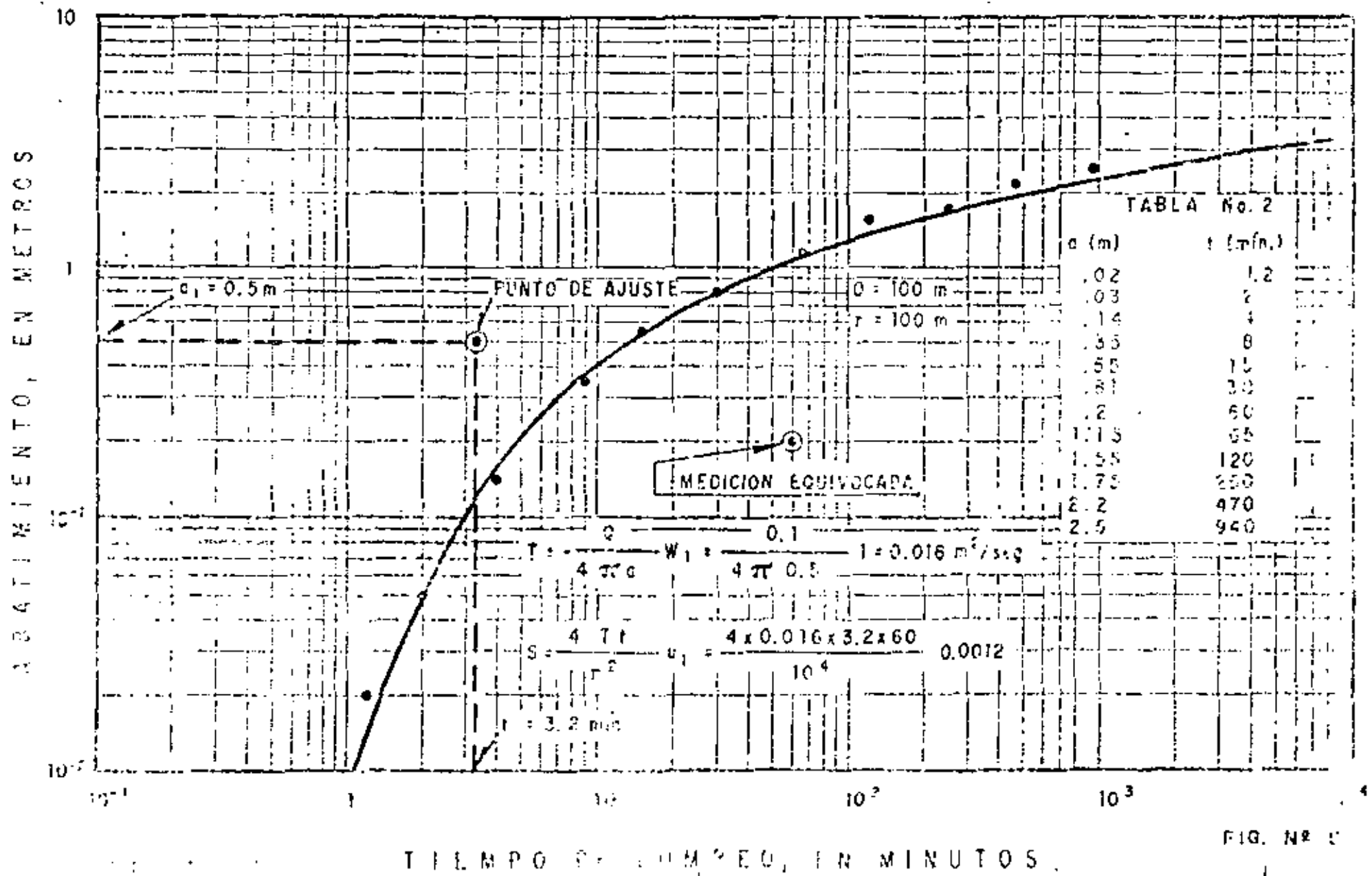
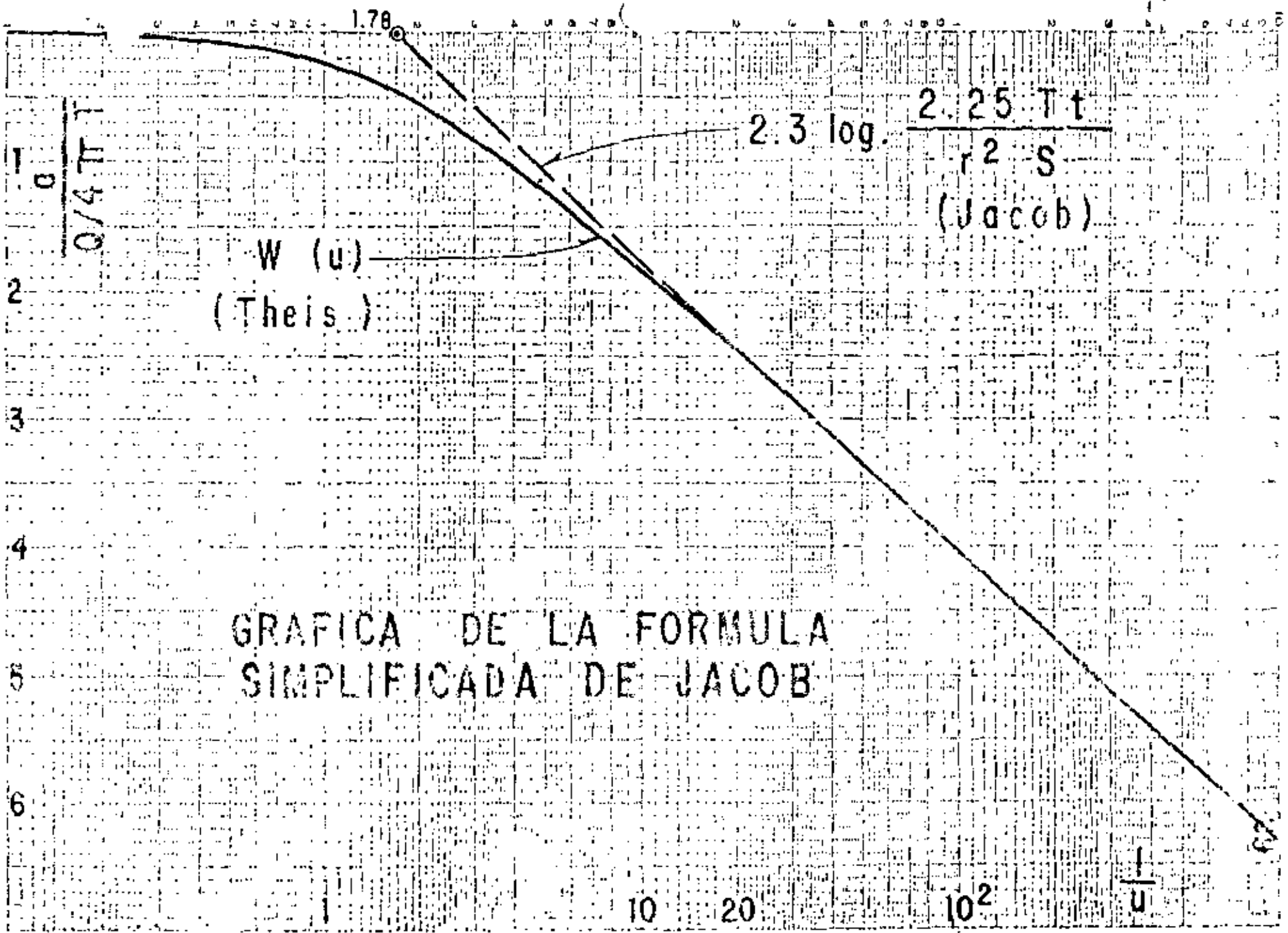
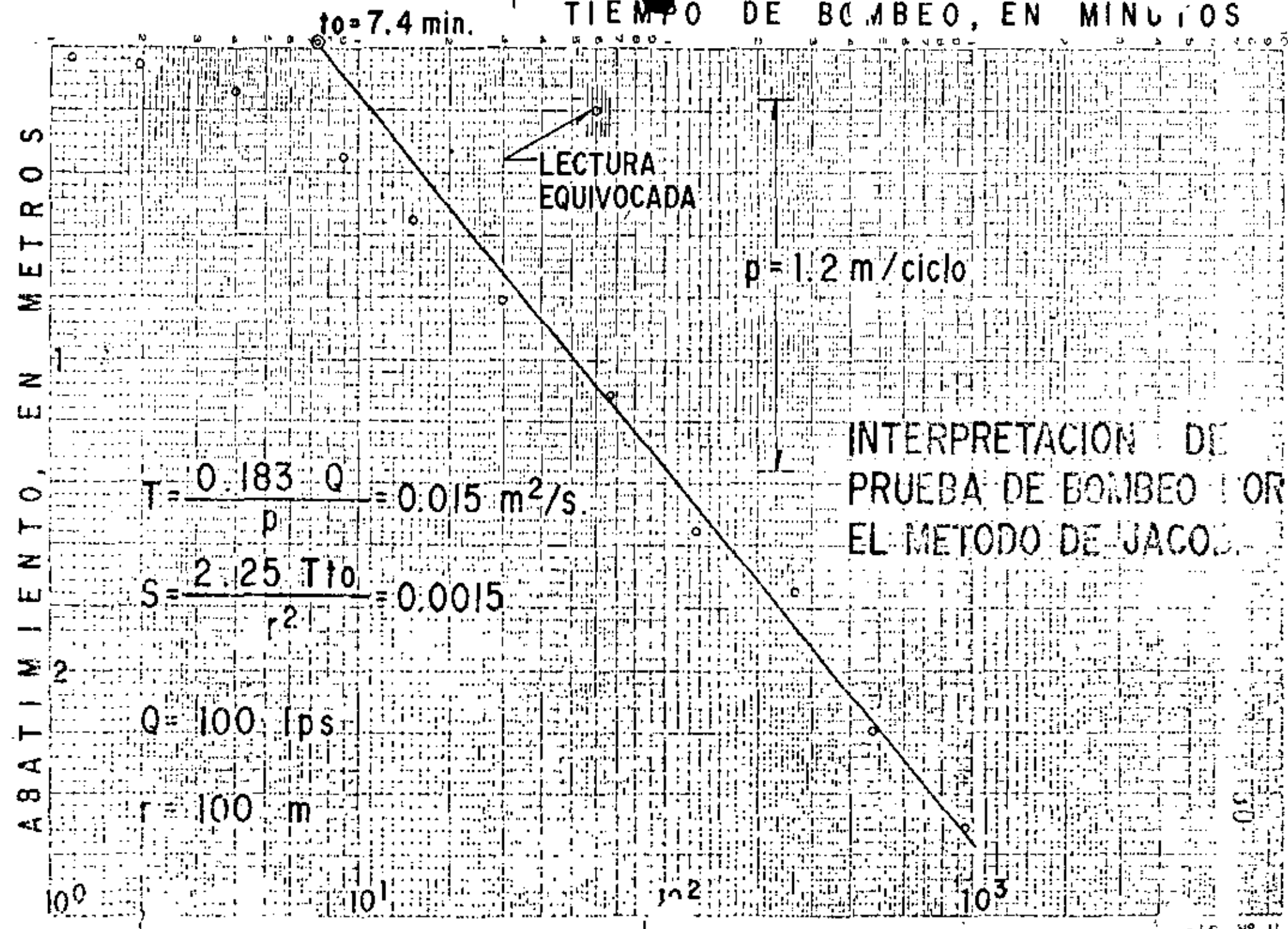


FIG. Nº 2



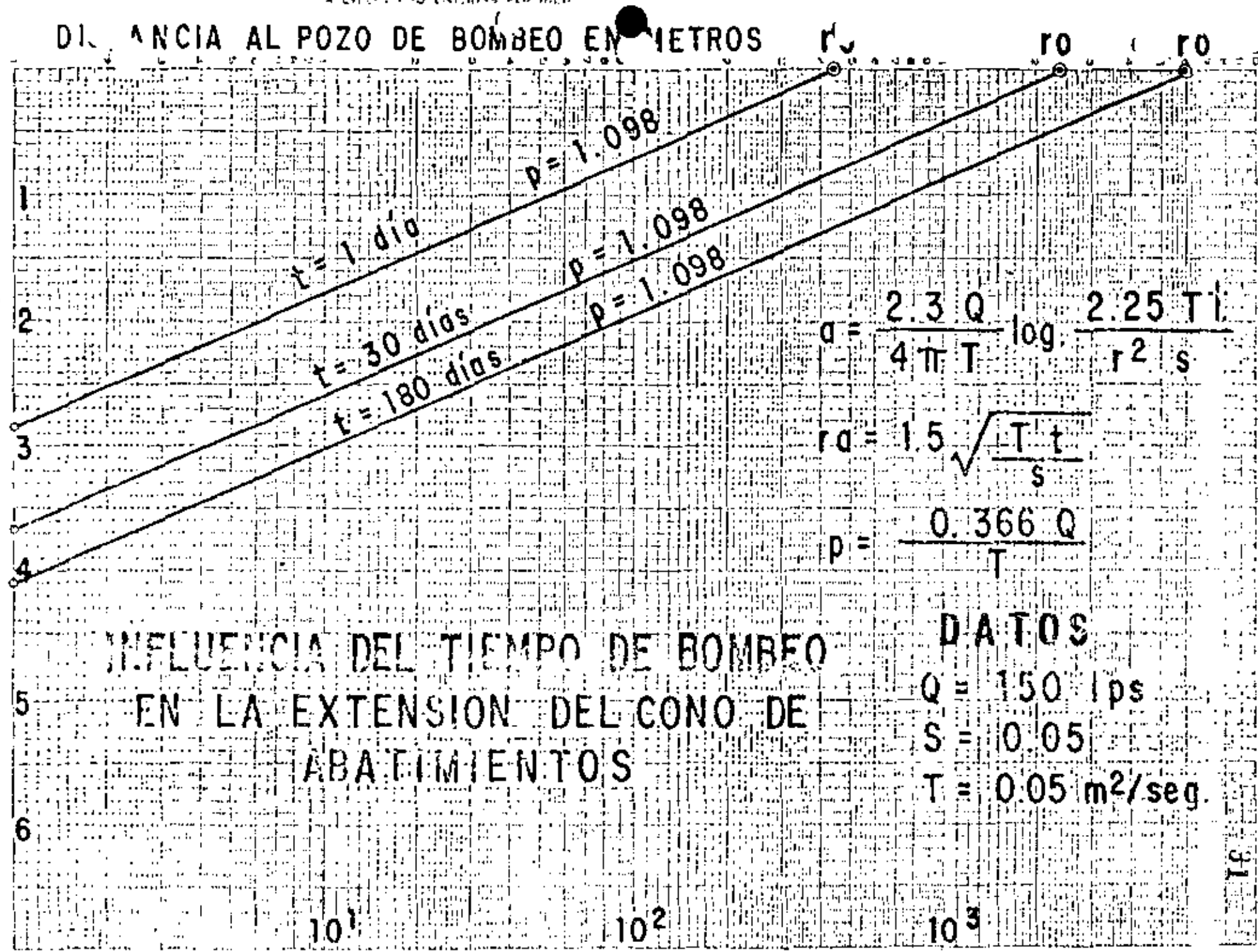
GRAFICA DE LA FORMULA
 SIMPLIFICADA DE JACOB



.....

DI. ANCIA AL POZO DE BOMBEO EN METROS

ABA TAMIENTO EN METROS



$$q = \frac{2.3 Q}{4 \pi T} \log \frac{2.25 T t}{r^2 S}$$

$$r_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T t}{S}}$$

$$p = \frac{0.366 Q}{T}$$

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE BOMBEO EN LA EXTENSION DEL CONO DE ABA TIMIENTOS

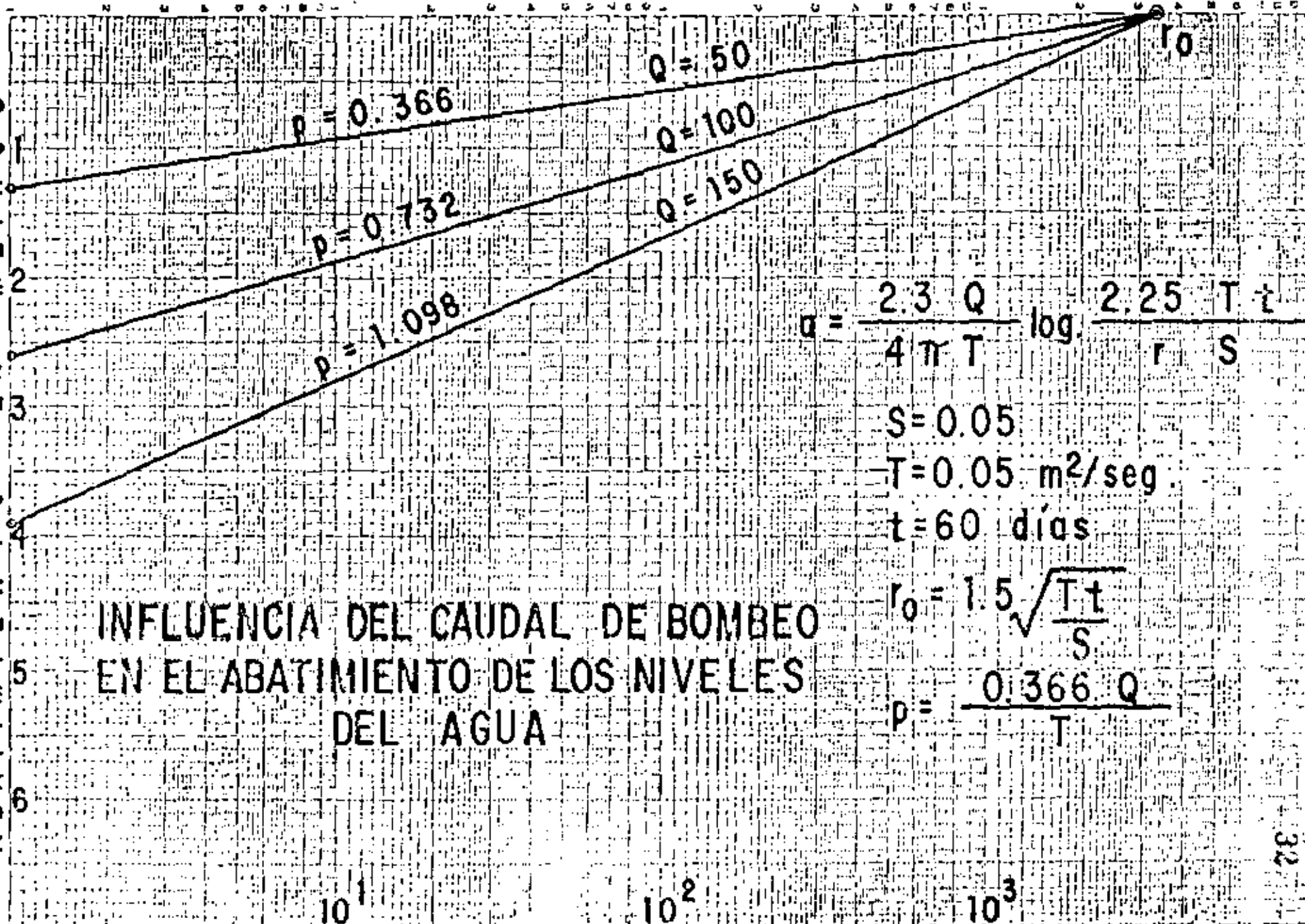
DATOS

- Q = 150 lps
- S = 0.05
- T = 0.05 m²/seg.

10¹ 10² 10³

DISTANCIA AL POZO DE BOMBEO EN METROS

ABATIMIENTO EN METROS

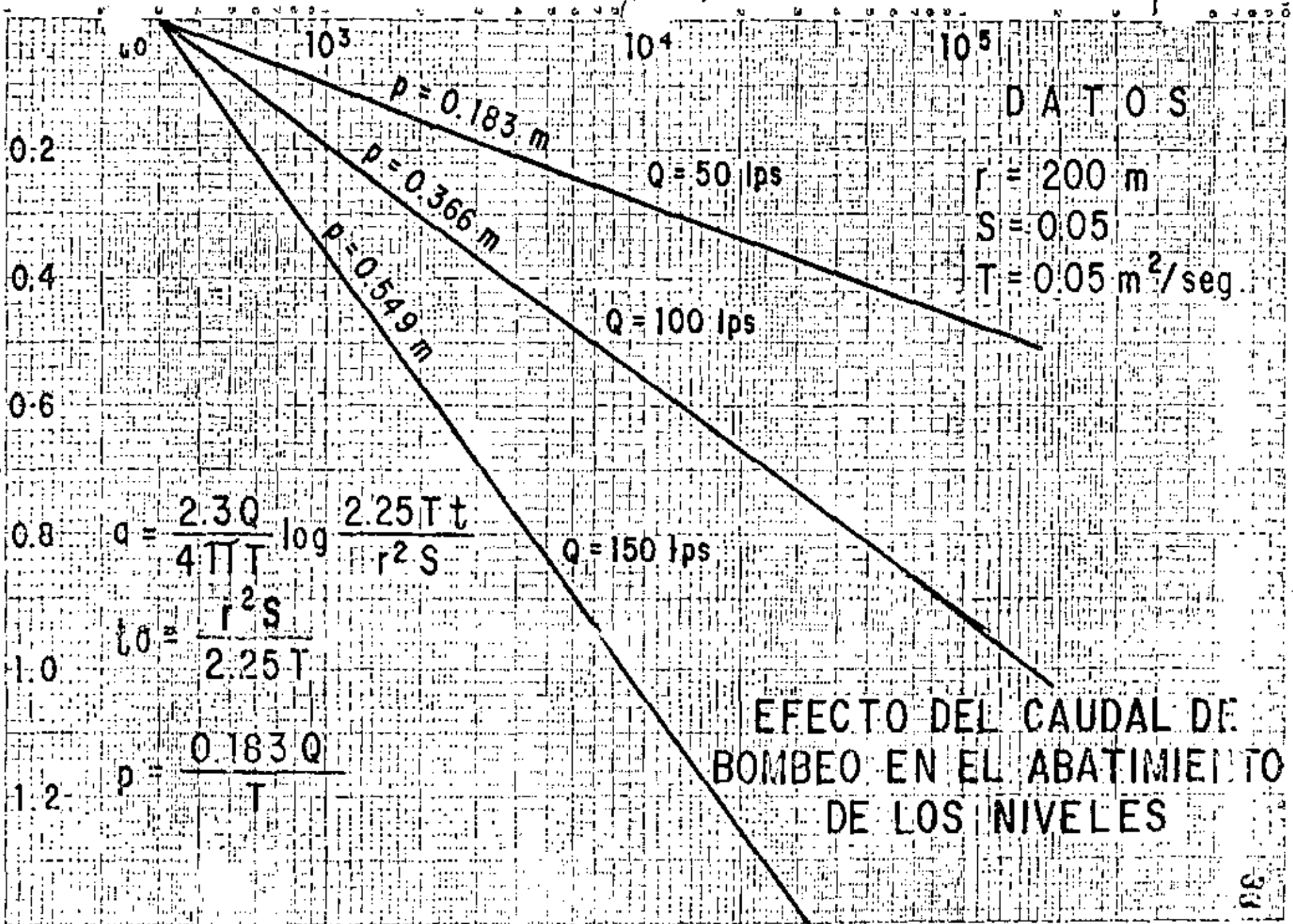


INFLUENCIA DEL CAUDAL DE BOMBEO EN EL ABATIMIENTO DE LOS NIVELES DEL AGUA

5

TIEMPO DE BOMBEO, EN MINUTOS

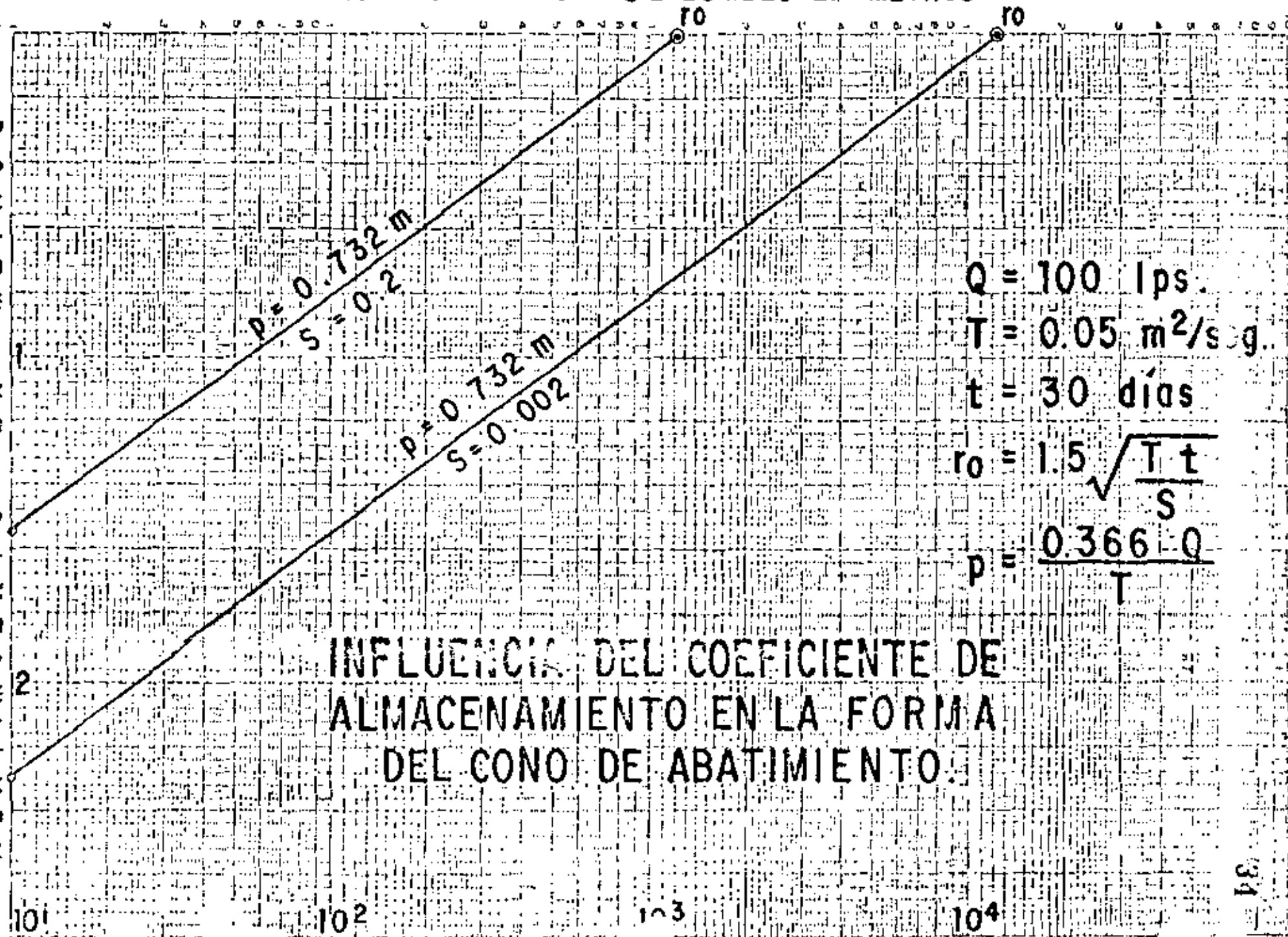
ABATIMIENTO, EN METROS





DISTANCIA / POZO ● E BOMBEO EN METROS

ABATIMIENTO EN METROS



$P = 0.732 \text{ m}$
 $S = 0.2$

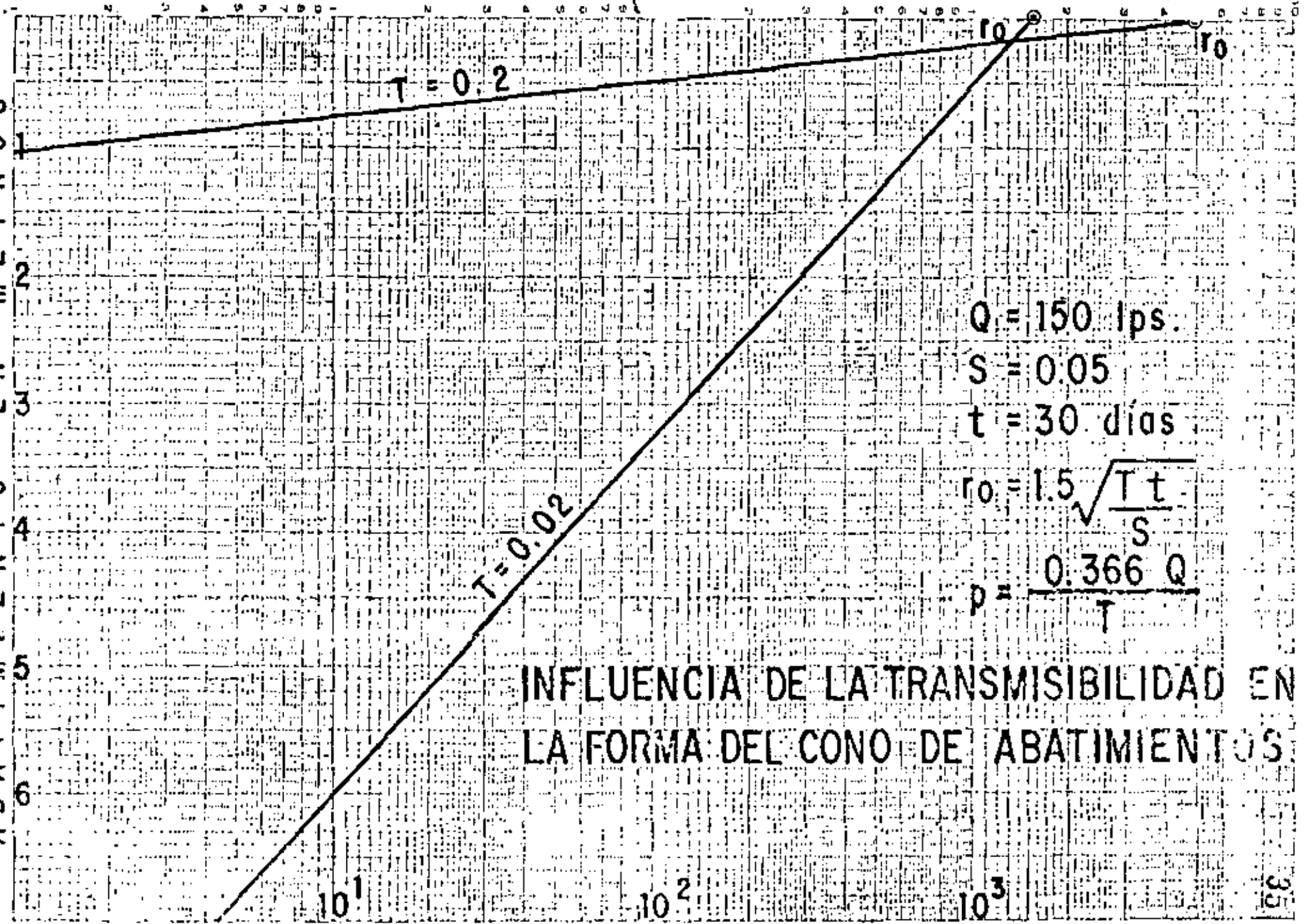
$P = 0.732 \text{ m}$
 $S = 0.002$

$Q = 100 \text{ lps.}$
 $T = 0.05 \text{ m}^2/\text{s. g.}$
 $t = 30 \text{ días}$
 $r_0 = 1.5 \sqrt{\frac{T t}{S}}$
 $p = \frac{0.366 Q}{T}$

INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO EN LA FORMA DEL CONO DE ABATIMIENTO.

DISTANCIA AL POZO DE BOMBEO EN METROS

ABATIMIENTO EN METROS



$Q = 150 \text{ lps.}$

$S = 0.05$

$t = 30 \text{ días}$

$$r_0 = 1.5 \sqrt{\frac{Tt}{S}}$$

$$s = \frac{0.366 Q}{T}$$

INFLUENCIA DE LA TRANSMISIBILIDAD EN LA FORMA DEL CONO DE ABATIMIENTOS



Penetración Parcial.-

Quando un pozo capta sólo una parte del espesor saturado de un acuífero, se le denomina "parcialmente penetrante".

En la porción de acuífero no penetrado por el pozo de bombeo el agua recorre trayectorias de mayor longitud para entrar al cedazo; por consiguiente, las pérdidas de carga en la formación son mayores en este sistema que en el de penetración total. En otras palabras: Los abatimientos en un pozo parcialmente penetrante son mayores que los provocados en uno totalmente penetrante, para un mismo caudal de extracción, aumentando el abatimiento conforme disminuye la penetración del pozo.

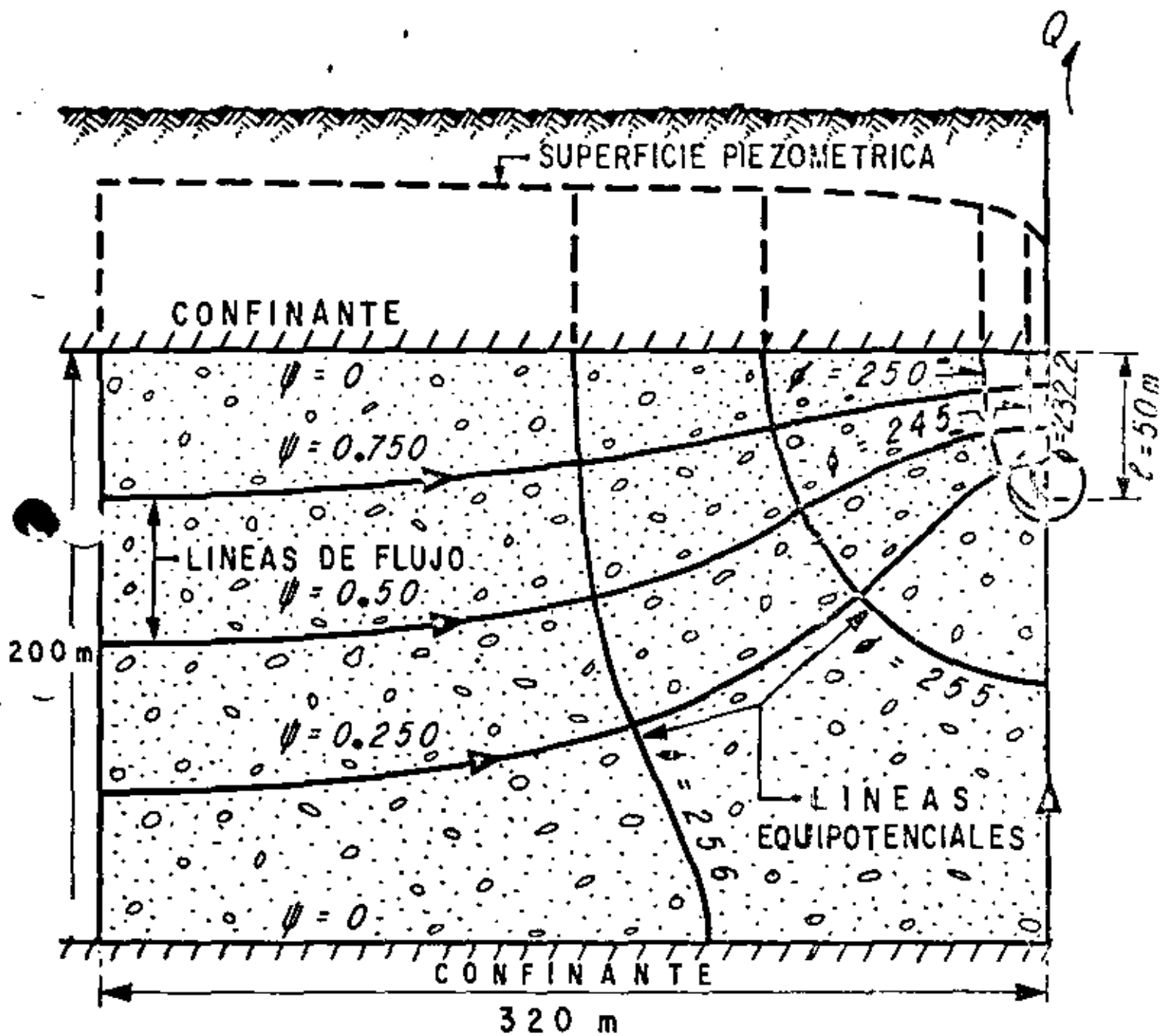
Para dar una idea aproximada de la disminución de la eficiencia hidráulica del pozo causada por la penetración parcial, considérese que si un pozo capta sólo la mitad del espesor saturado de un acuífero, el abatimiento provocado en él será algo menor que el doble del provocado en un pozo totalmente penetrante, para el mismo caudal de bombeo. Si se considera ahora un mismo abatimiento, el caudal que puede proporcionar un pozo es tanto menor cuanto menor es la penetración de su cedazo.

En las proximidades de estos pozos el flujo es tridimensional; por ello, el abatimiento registrado en el pozo de bombeo y en pozos de observación próximos a él, depende, -- entre otros factores, de la longitud y posición de los cedazos. Esto complica la interpretación de las pruebas de bombeo, ya que los abatimientos son función también de las características constructivas de los pozos. Para simplificar la interpretación es conveniente ubicar los pozos de observación a distancias equivalentes al espesor del acuífero, o mayores, para las cuales el efecto de penetración es mínimo o nulo.

El nivel del agua en un pozo de observación situado a tales distancias se comporta como si el pozo de bombeo fuera totalmente penetrante, y la prueba se interpreta en la forma ya indicada; lo mismo puede hacerse cuando el pozo de observación penetra totalmente al acuífero, independientemente de su ubicación con respecto al pozo de bombeo.

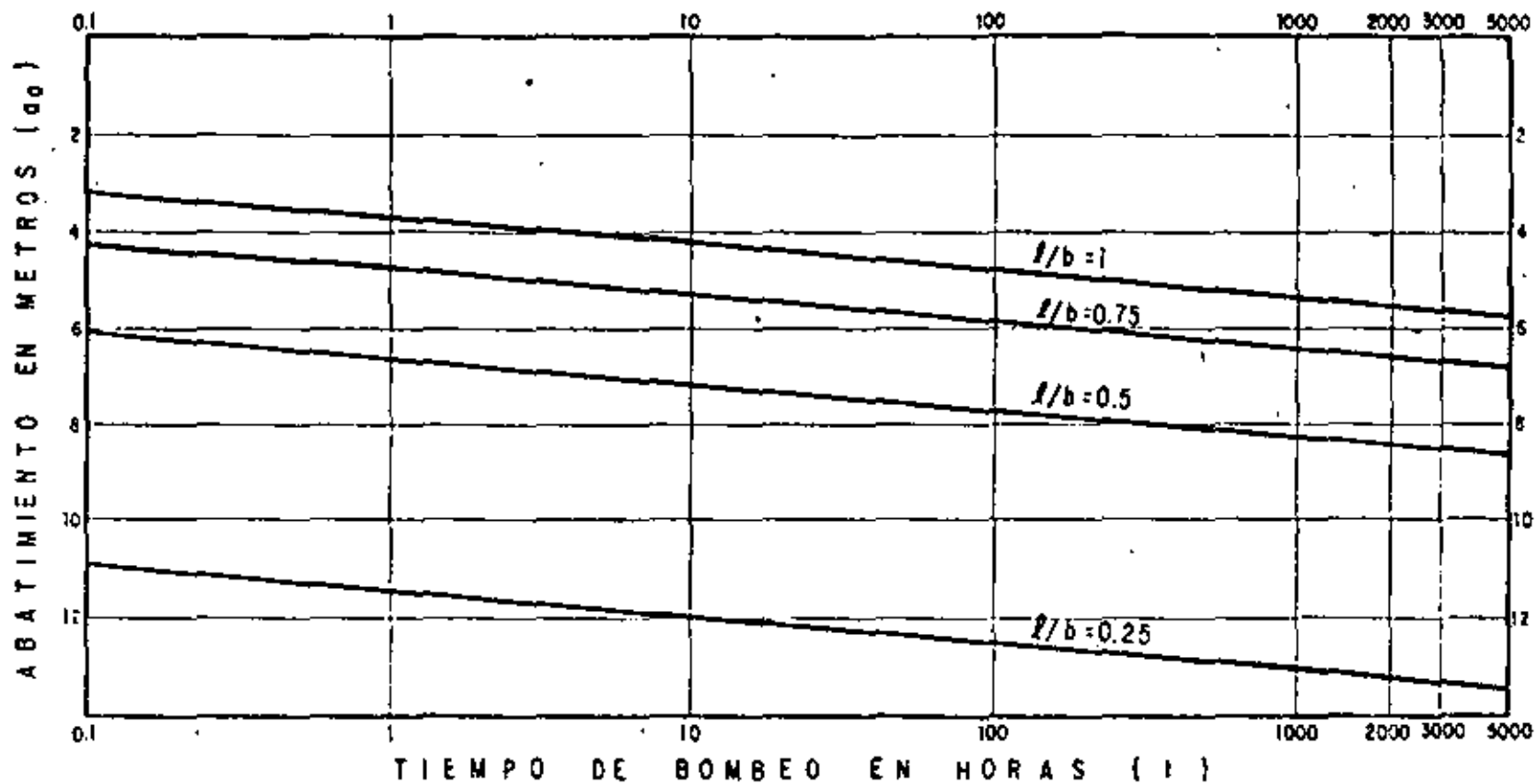
Fuera de estos dos casos, la interpretación es bastante laboriosa, pues hay que construir una curva tipo pa-

FLUJO HACIA UN POZO PARCIALMENTE PENETRANTE

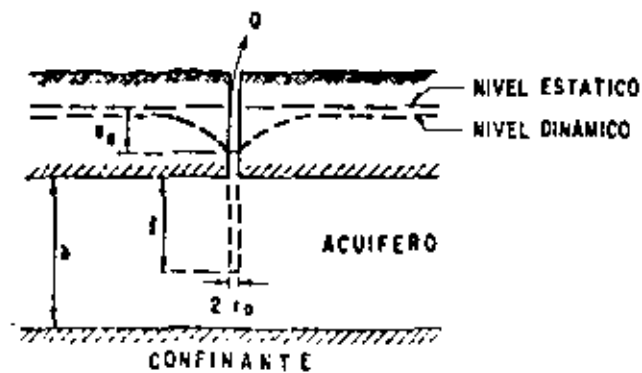


$Q = 150$ lps
 $t = 2000$ hrs
 $T = 0.02$ m²/s
 $S = 0.02$





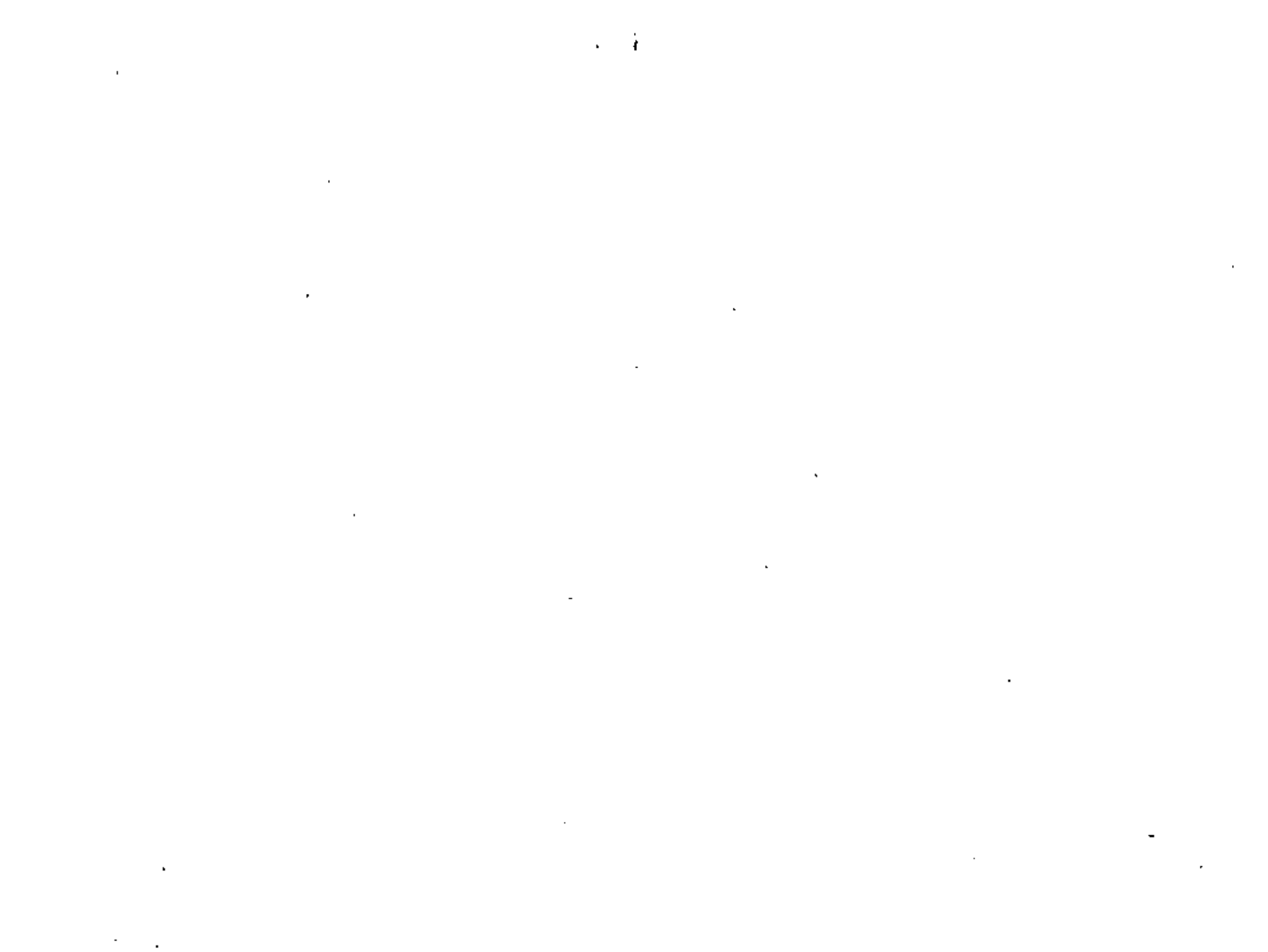
$Q = 150$ lps.
 $T = 5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg.}$
 $S = 2 \times 10^{-3}$
 $b = 200$ m.
 $l_0 = 0.2$ m

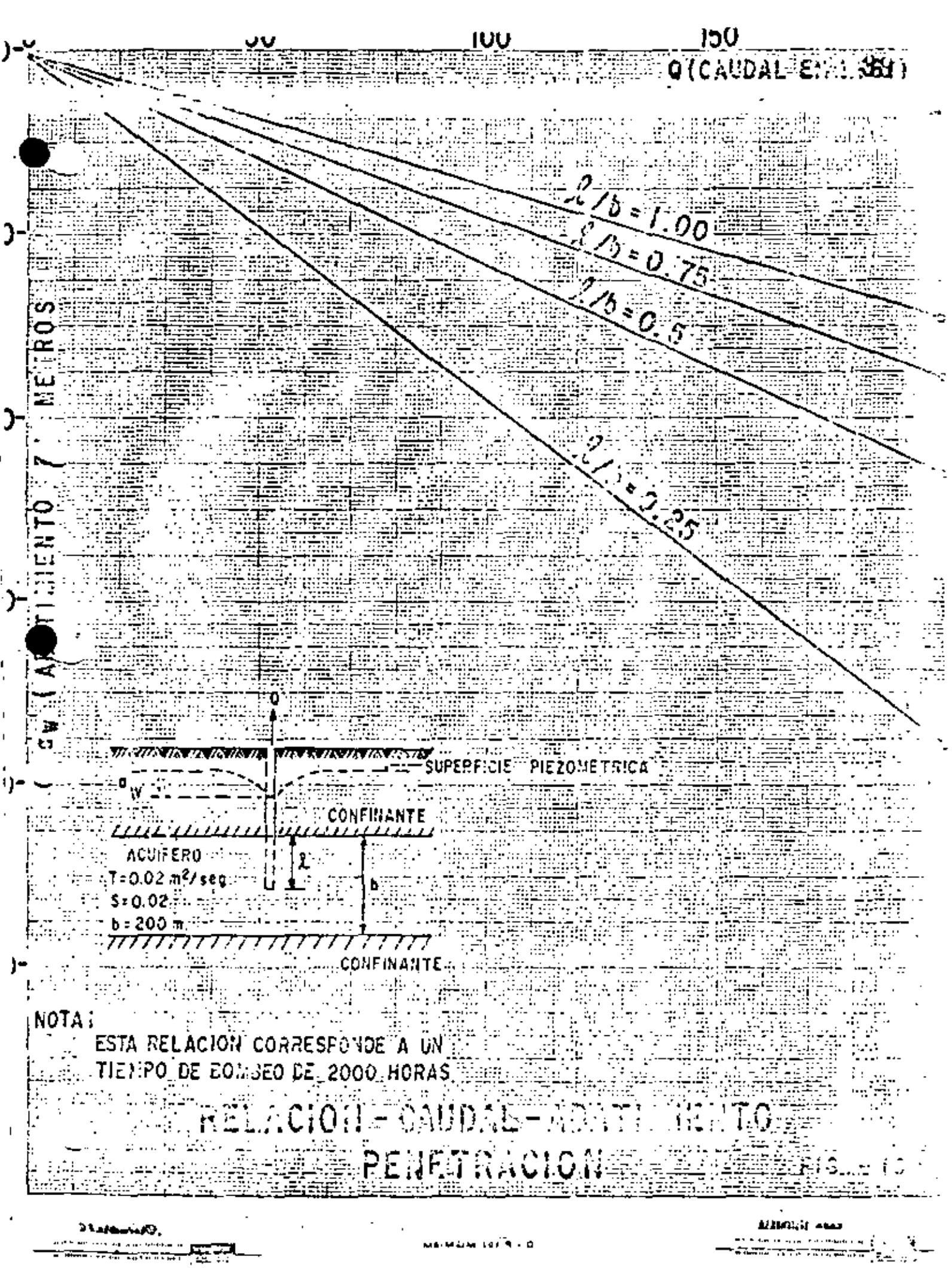


INFLUENCIA DE LA PENETRACION PARCIAL EN EL ABATIMIENTO DEL NIVEL DEL POZO DE BOMBEO

FIGURA No 13

35



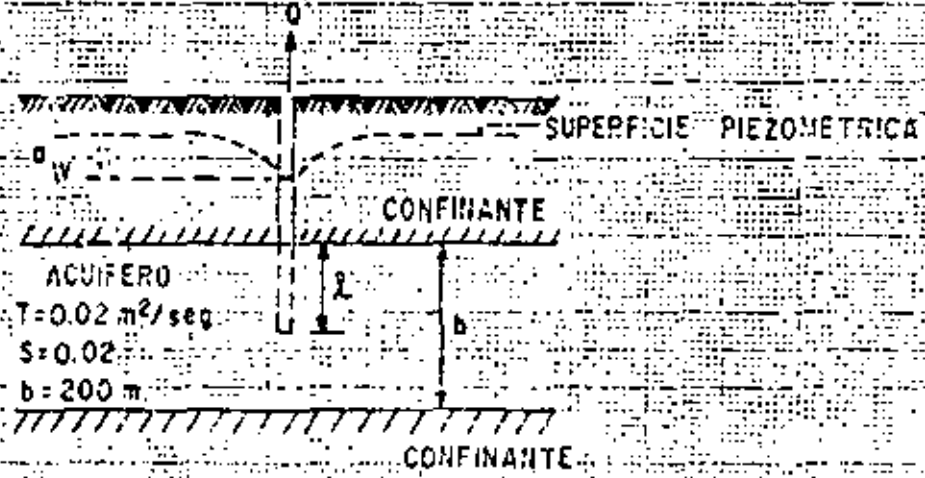


150
Q (CAUDAL EN L/SEG)

$r/b = 1.00$
 $r/b = 0.75$
 $r/b = 0.5$

$r/b = 0.25$

10
3
1
0.1
s (ABAJAMIENTO EN METROS)



NOTA:
ESTA RELACION CORRESPONDE A UN
TIEMPO DE BOMBEO DE 2000 HORAS

RELACION - CAUDAL - ABAJAMIENTO
PENETRACION

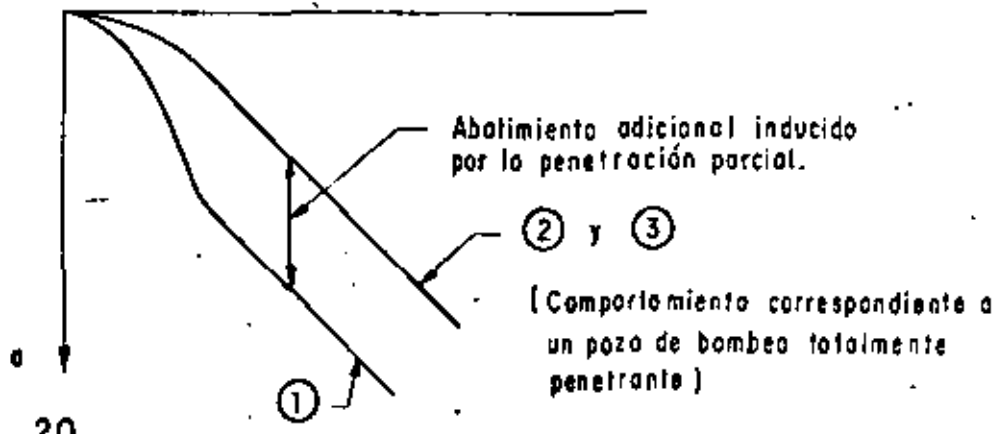
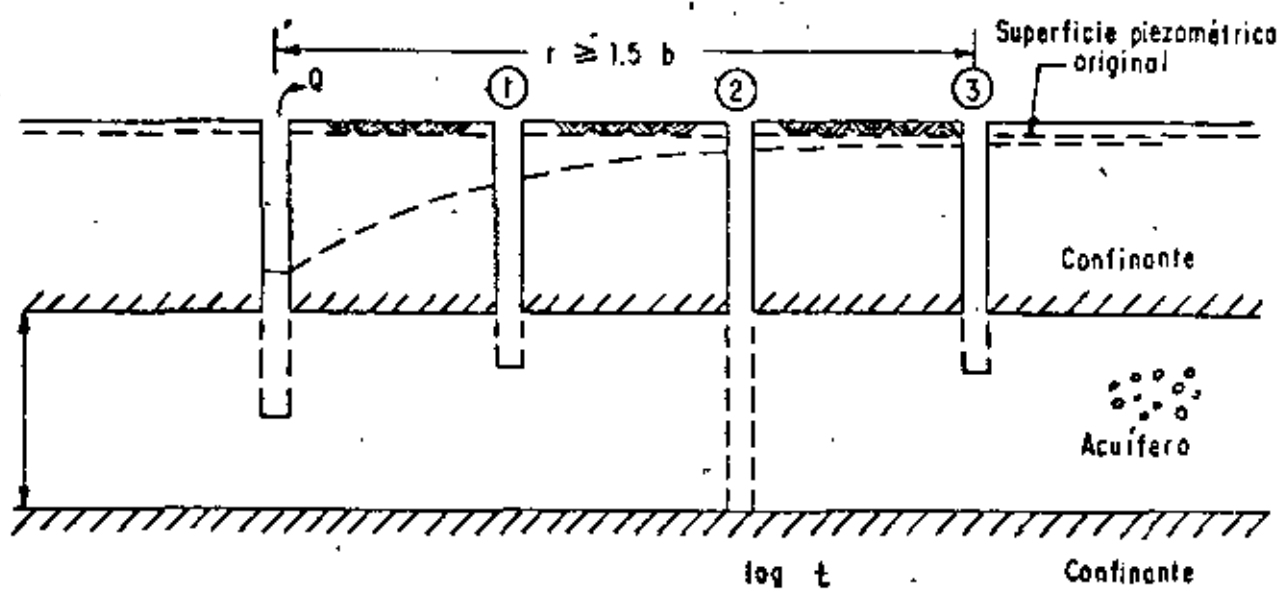


FIGURA No. 20

ra las características de los pozos utilizados en la prueba.

En la figura se ilustra el comportamiento del nivel del agua en pozos de observación a distancias y de características constructivas diferentes.

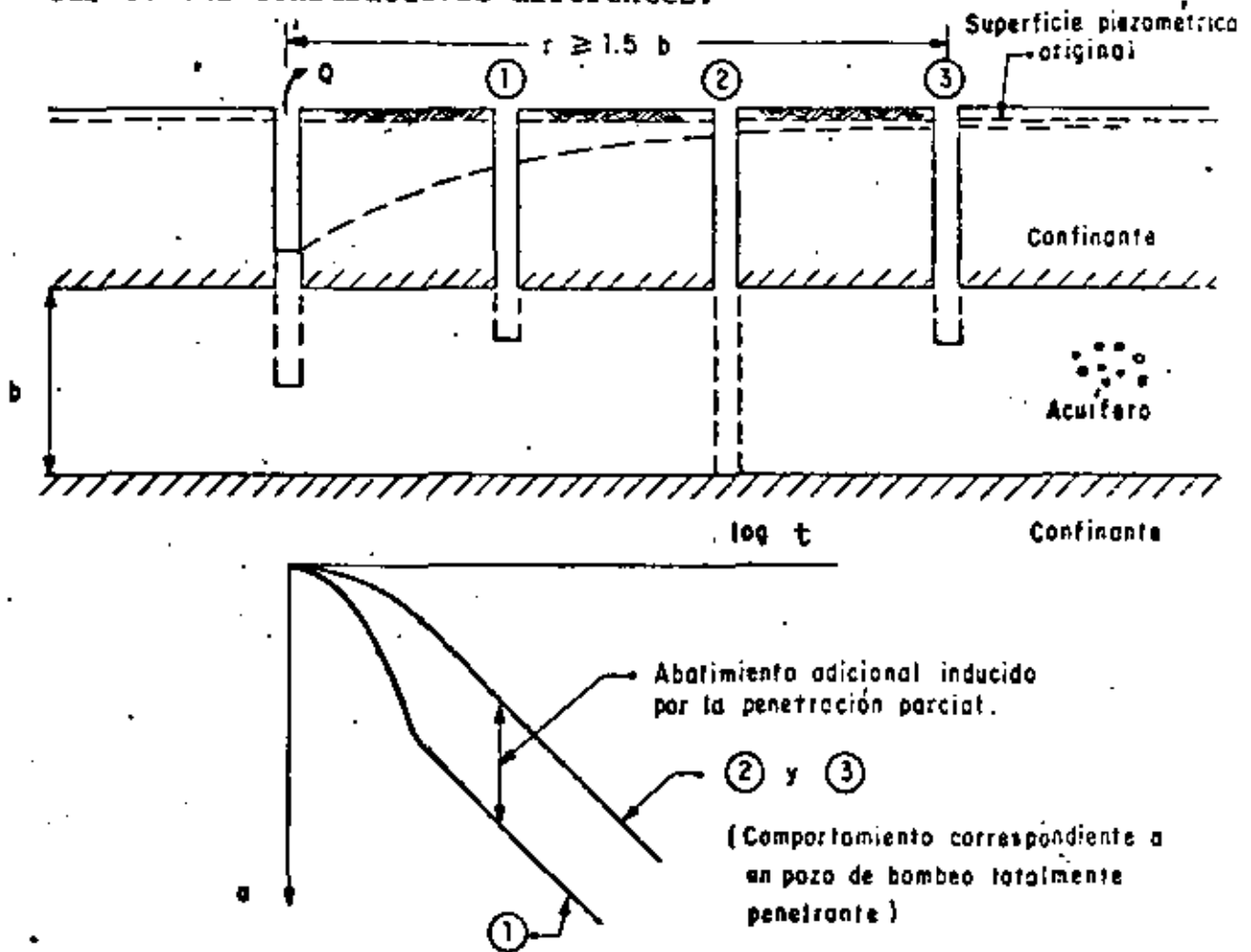


FIGURA No. 20

3.3.- POZOS EN ACUIFEROS SEMICONFINADOS.

Probablemente, el acuífero más común en la naturaleza es el de tipo semiconfinado: los rellenos siempre tienen cierta estratificación, alternándose estratos de granulometría variada. Cuando un estrato de material permeable queda limitado verticalmente por materiales, también saturados, de menor permeabilidad, se tiene un acuífero semiconfinado como el ilustrado en la figura



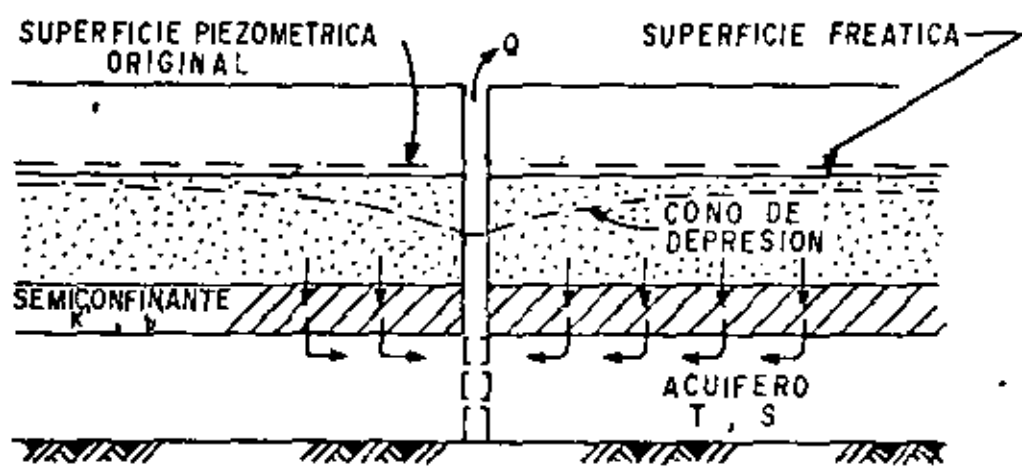


FIGURA No.21



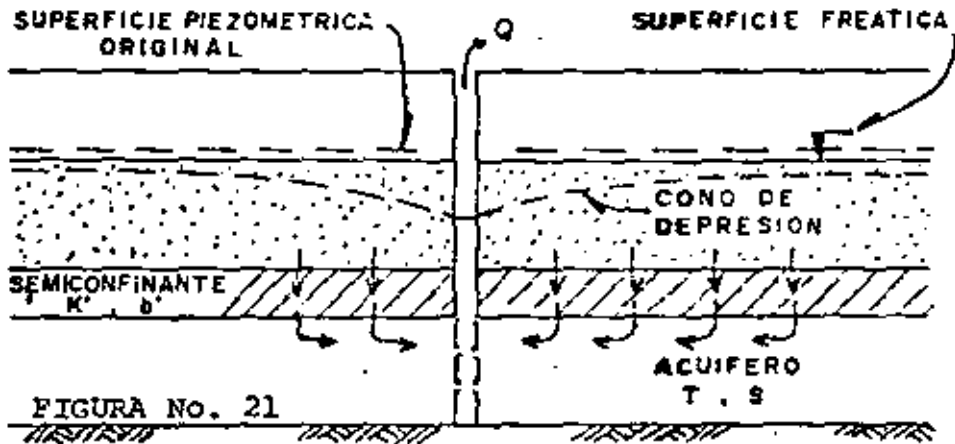


FIGURA No. 21

Al bombearse un acuífero de este tipo se provocan abatimientos de sus niveles piezométricos, generándose una diferencia vertical de cargas, que induce el flujo descendente del agua a través del semiconfinante. La cantidad de agua que circula a través de éste es directamente proporcional a la diferencia de cargas entre las superficies freática y piezométrica, e inversamente proporcional a la resistencia hidráulica del mismo estrato.

Puesto que en este sistema sólo una parte del volumen bombeado procede del acuífero, y el resto es aportado por el estrato adyacente al semiconfinante, el abatimiento de los niveles piezométricos es menor que en el caso del acuífero confinado. Como la aportación vertical aumenta con el tiempo, el abatimiento de los niveles piezométricos va decreciendo, hasta que la aportación vertical equilibra el caudal de extracción; y en ese momento, los niveles piezométricos se estabilizan.

La solución correspondiente a este sistema es la siguiente:

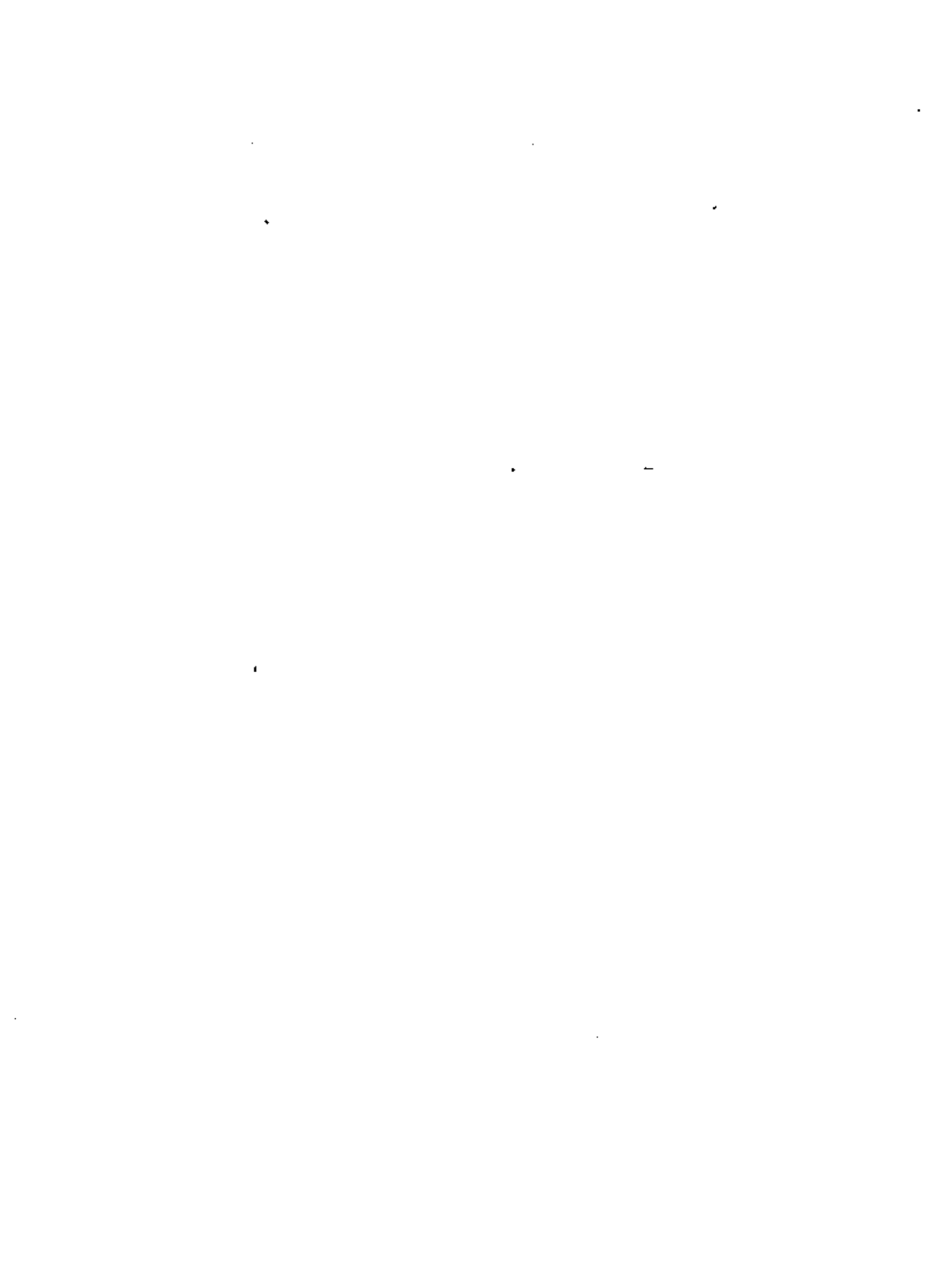
$$q = \frac{Q}{4 \pi T} W(u, r/B)$$

donde:

$$B = \sqrt{T b' / K'}$$

siendo \$k'\$ y \$b'\$ la permeabilidad vertical y el espesor del estrato semiconfinante, respectivamente.

Las curvas tipo correspondientes a esta solución se presentan en la figura , en la cual puede apreciarse el comportamiento arriba descrito.



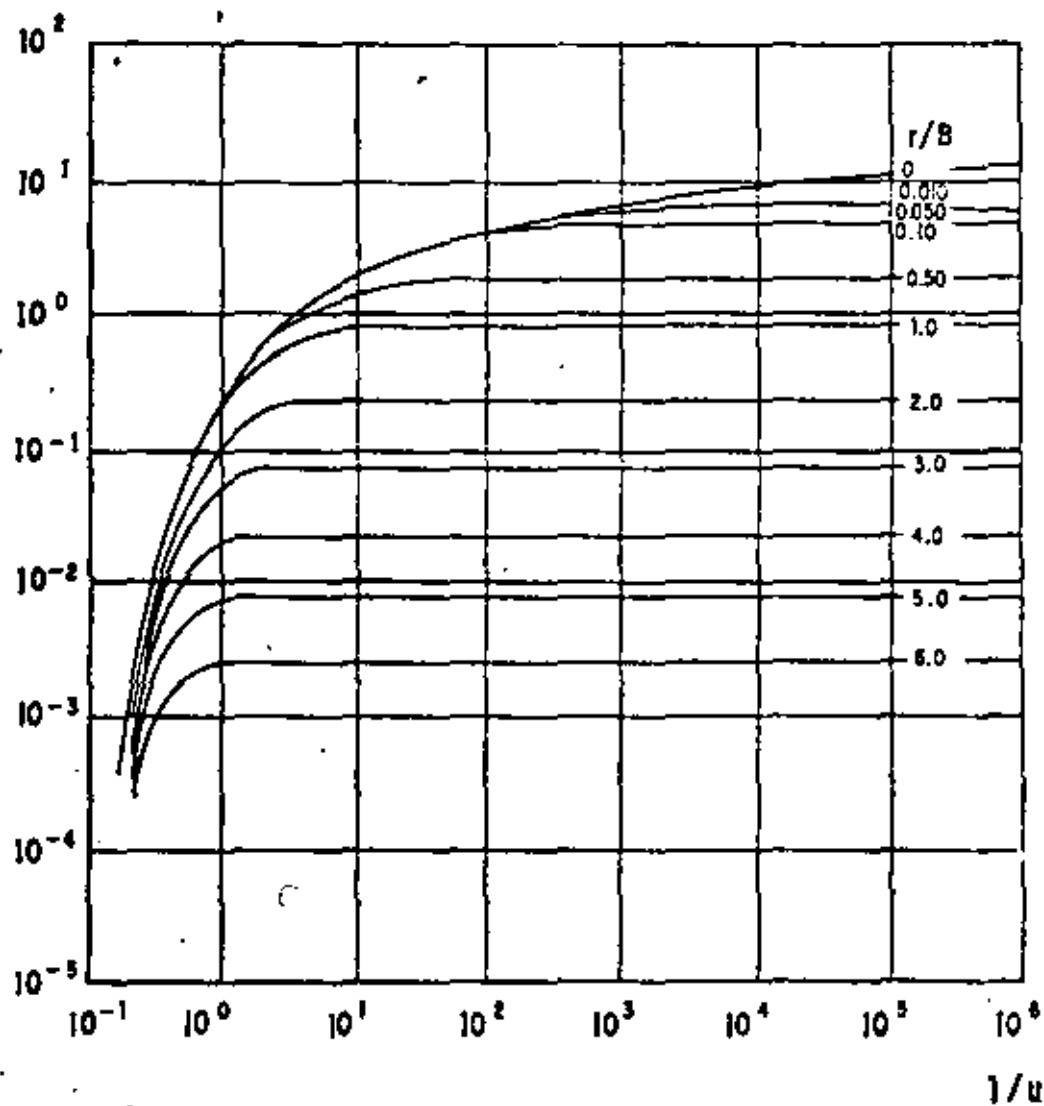
$W(u, r/B)$ 

FIGURA N° 22



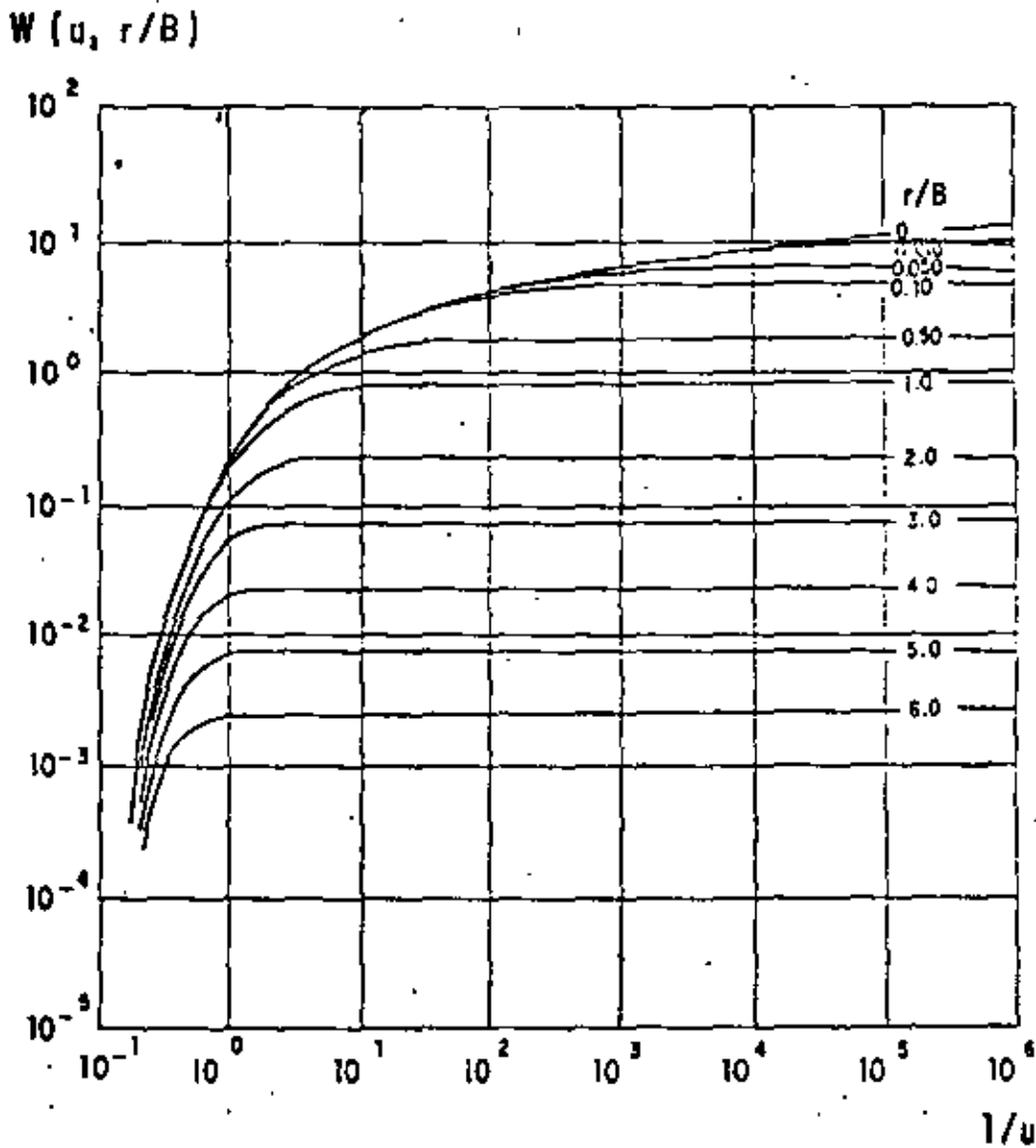


FIGURA No. 22

El procedimiento de interpretación de las pruebas en este caso es semejante al seguido en el caso de los acuíferos confinados, con la diferencia de que ahora debe buscarse la coincidencia entre la curva de campo y una de las curvas tipo. Lograda la coincidencia, se selecciona un punto de ajuste, y se substituyen los valores de sus coordenadas en las ecuaciones correspondientes, para deducir los parámetros buscados.



3.4.- POZOS EN ACUIFEROS LIBRES.

Los acuíferos libres se caracterizan por estar limitados superiormente por una superficie freática; puesto que el espesor saturado del acuífero varía con las fluctuaciones de esta superficie, la transmisibilidad del acuífero es también variable en el área y en el tiempo. Si las fluctuaciones de los niveles son poco significativas con respecto al espesor del acuífero, la transmisibilidad puede suponerse constante, y la interpretación de las pruebas se efectúa como si se tratara de un acuífero confinado. En cambio, si dichas fluctuaciones son importantes -específicamente, mayores del 20% del espesor saturado del acuífero-, los abatimientos medidos se corrigen en la forma siguiente:

$$a_c = a - \frac{a^2}{2b}$$

siendo a_c el abatimiento corregido, y b , el espesor saturado inicial del acuífero. Los abatimientos así corregidos, se interpretan como si se tratara de un acuífero confinado.

IV.- HIDRAULICA DEL POZO DE BOMBEO.

La hidráulica de los pozos de bombeo es sumamente compleja, debido a que en el interior de ellos y en su vecindad inmediata se presentan diversos efectos locales. Por una parte, dado que el gradiente hidráulico es máximo en las proximidades del pozo y que la permeabilidad es mayor por la presencia de un filtro artificial o desarrollado naturalmente, la velocidad del agua puede ser tal que el régimen de flujo adquiere carácter turbulento. Por otra parte, hay un incremento notable de la velocidad del agua al concentrarse el flujo a través de las ranuras; un cambio brusco de la dirección del agua al ser acelerada verticalmente por los impulsos, y fricciones en el cedazo y en la columna de succión. Todo esto se traduce en una repentina pérdida de carga en el pozo. Como resultado, el nivel del agua en su interior no se encuentra en la intersección del cono de depresión y la pared externa del ademe, sino más abajo, siendo la diferencia la pérdida local de carga.



De acuerdo con lo anterior, el abatimiento tot. provocado en el pozo de bombeo tiene dos componentes principales: el abatimiento debido a la resistencia que opone la formación a la circulación del agua, el cual es directamente proporcional al caudal extraído; y el abatimiento provocado en el interior del propio pozo, que es directamente proporcional al caudal elevado a una cierta potencia próxima al cuadrado.

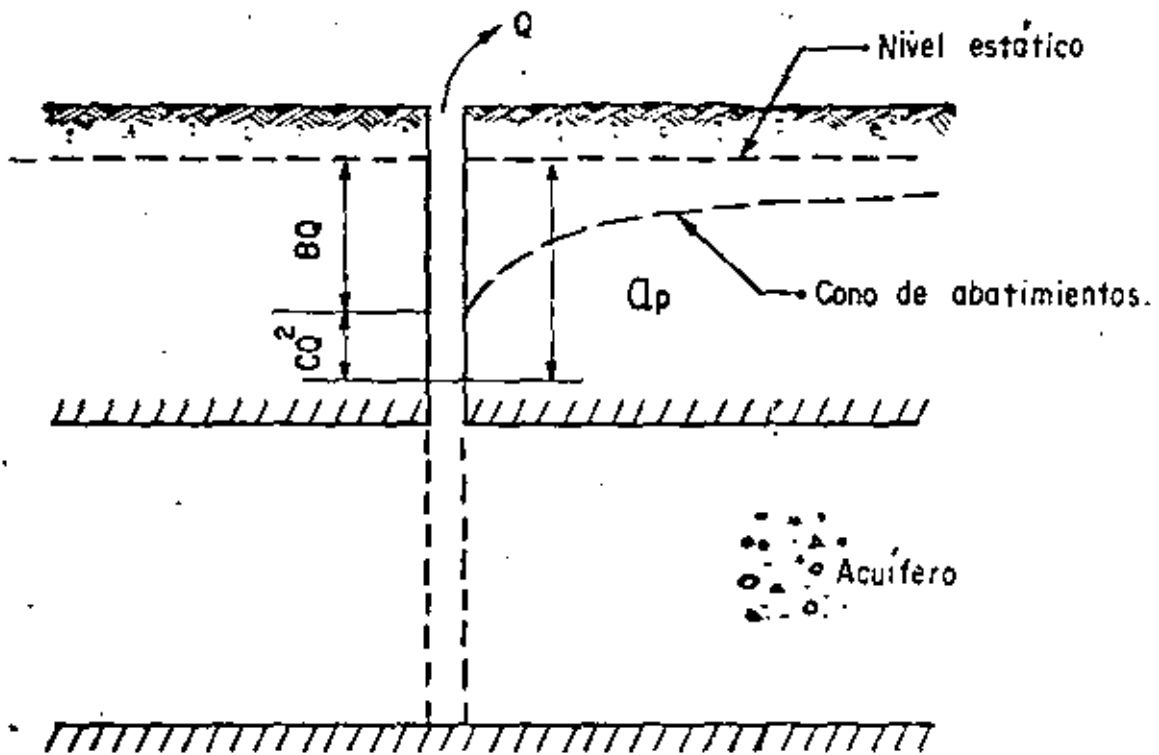


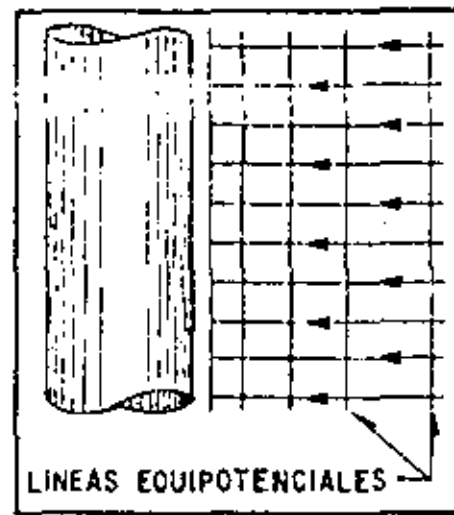
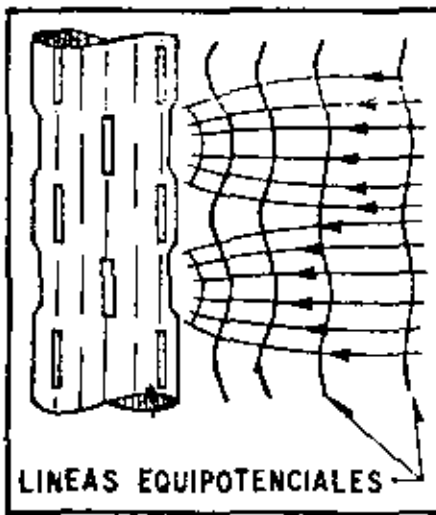
FIGURA No. 23

Lo anterior puede expresarse:

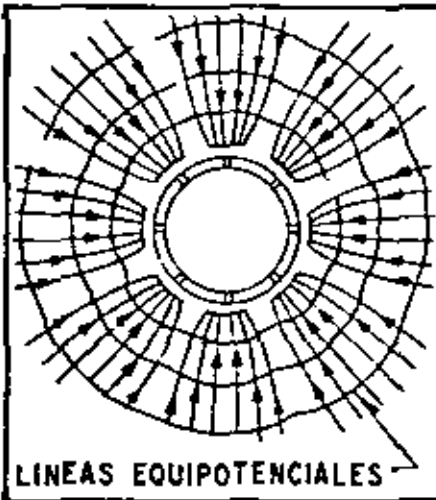
$$a_p = BQ + CQ^2$$

en la que: a_p es el abatimiento total en el pozo de bombeo; B , un coeficiente representativo de la resistencia del acuífero, y C , un coeficiente cuyo valor es función de las característi-

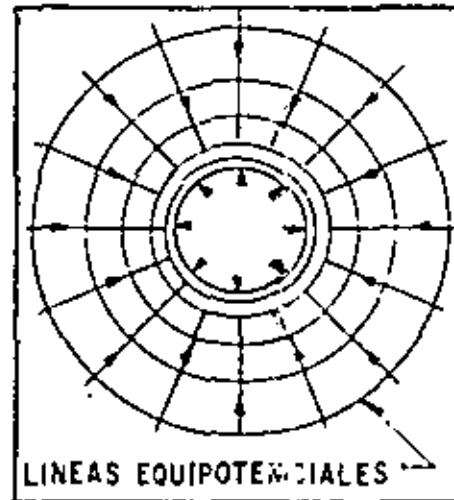




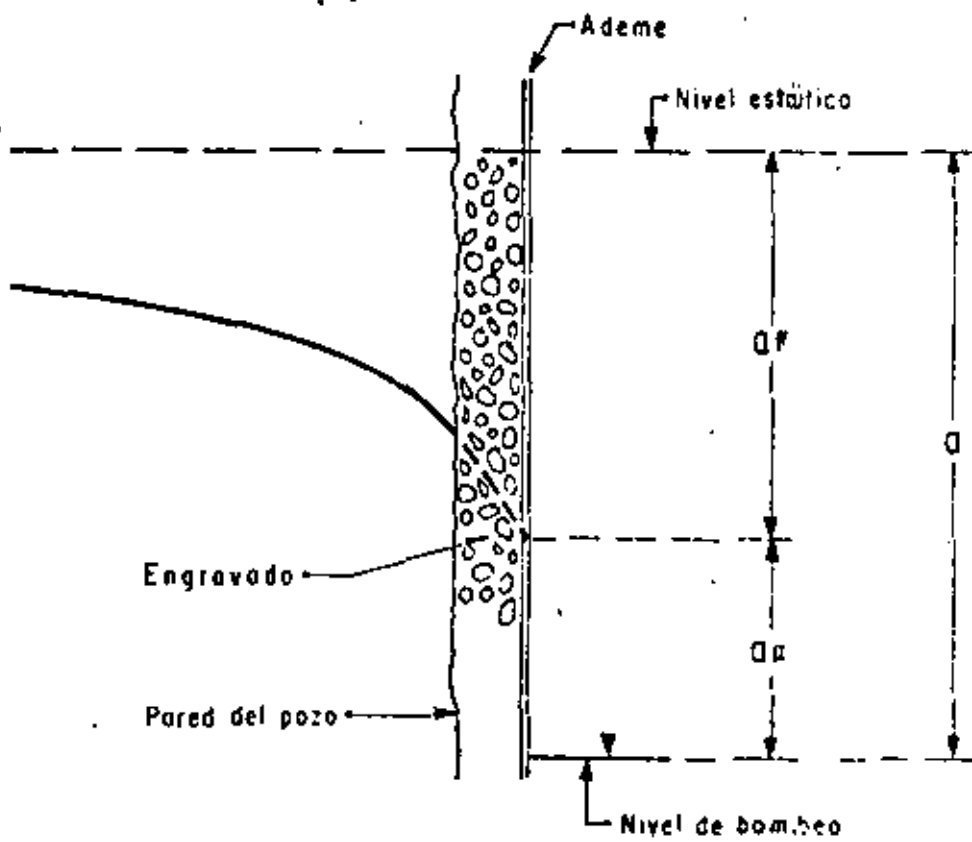
C O R T E



TUBERIA RANURADA



P L A N T A



cas constructivas del pozo.

-El valor del coeficiente B depende del tipo de sistema de flujo de que se trata; por ejemplo, en el caso de un pozo totalmente penetrante en un acuífero confinado, el abatimiento en la formación está dado por la expresión:

$$Q = \frac{Q}{4 \pi T} W(u)$$

por tanto:

$$B = \frac{1}{4 \pi T} W(u)$$

A la relación entre el caudal bombeado y el abatimiento que provoca, se le denomina "caudal específico", y puede escribirse:

$$\frac{Q}{Q_p} = \frac{1}{B + CQ}$$

Este parámetro representa en una forma más objetiva la capacidad transmisora de un acuífero; un caudal específico alto refleja una alta transmisibilidad, y viceversa. Presenta la ventaja de que su valor no está sujeto a errores de interpretación, ya que se obtiene como el coeficiente de dos términos medidos (caudal y abatimiento), y guarda una proporcionalidad más o menos directa con la transmisibilidad, lo que permite utilizarlo para deducir valores aproximados de ésta cuando se carece de pruebas de bombeo. Es importante destacar que el caudal específico no es constante sino que decrece con el caudal y con el tiempo de bombeo, como puede inferirse de la última expresión.

Para el cálculo de los coeficientes B y C, se utiliza la llamada "prueba escalonada", propuesta por C.E. Jacob. Esta prueba consiste en bombear el pozo en varias etapas sucesivas, en cada una de las cuales se mantiene el caudal constante; generalmente, el caudal se varía en forma creciente, -- siendo recomendable hacerlo en un rango lo mayor posible; la duración de cada etapa es de varias horas. Simultáneamente, se observa la fluctuación del nivel del agua en el pozo; la figura ilustra esquemáticamente el comportamiento típico del nivel del agua en una prueba escalonada.

A partir de la gráfica abatimiento-tiempo se obtienen los elementos necesarios para deducir los valores de los



INTERPRETACION DE PRUEBAS DE BOMBEO ESCALONADAS

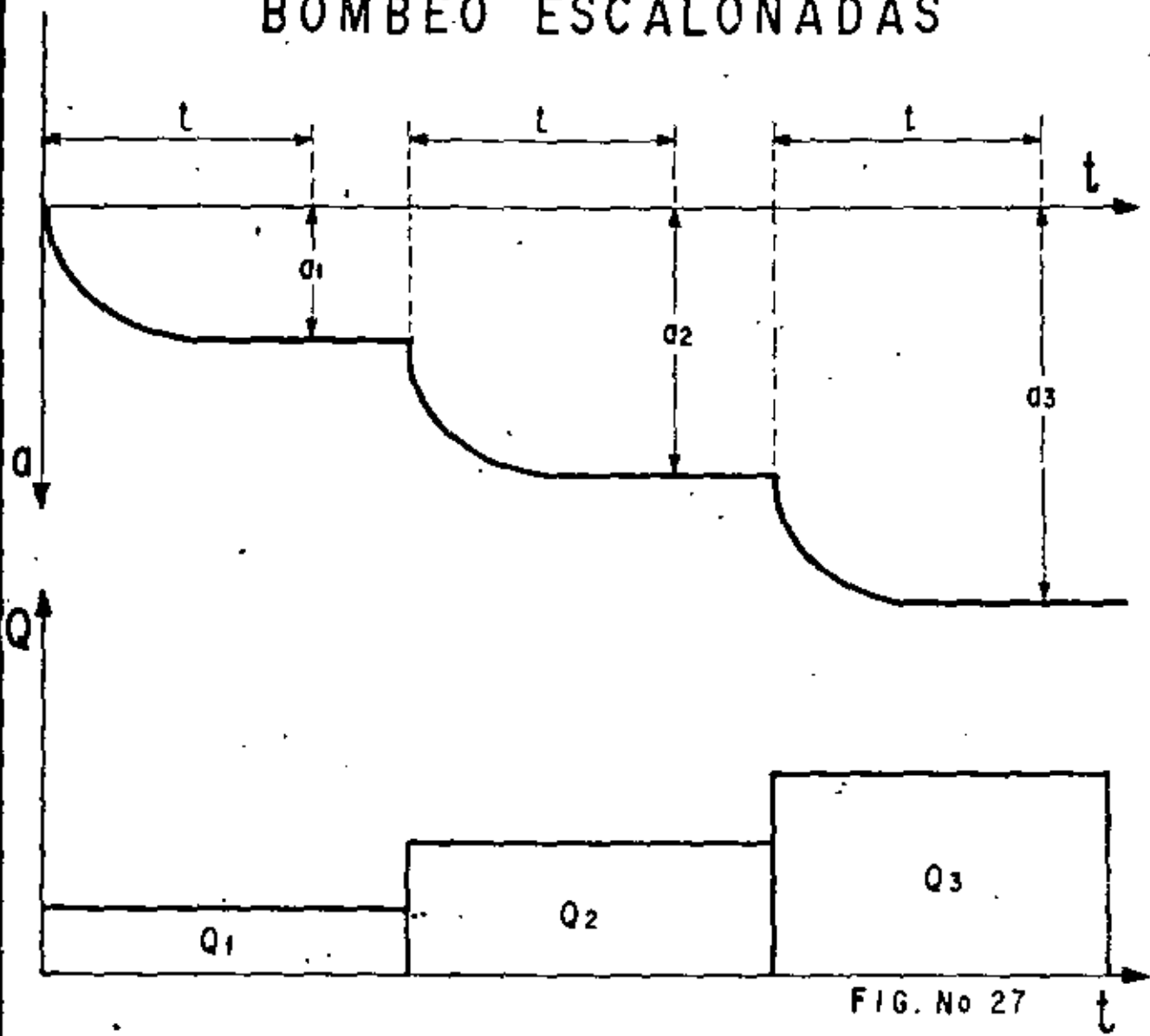


FIG. No 27

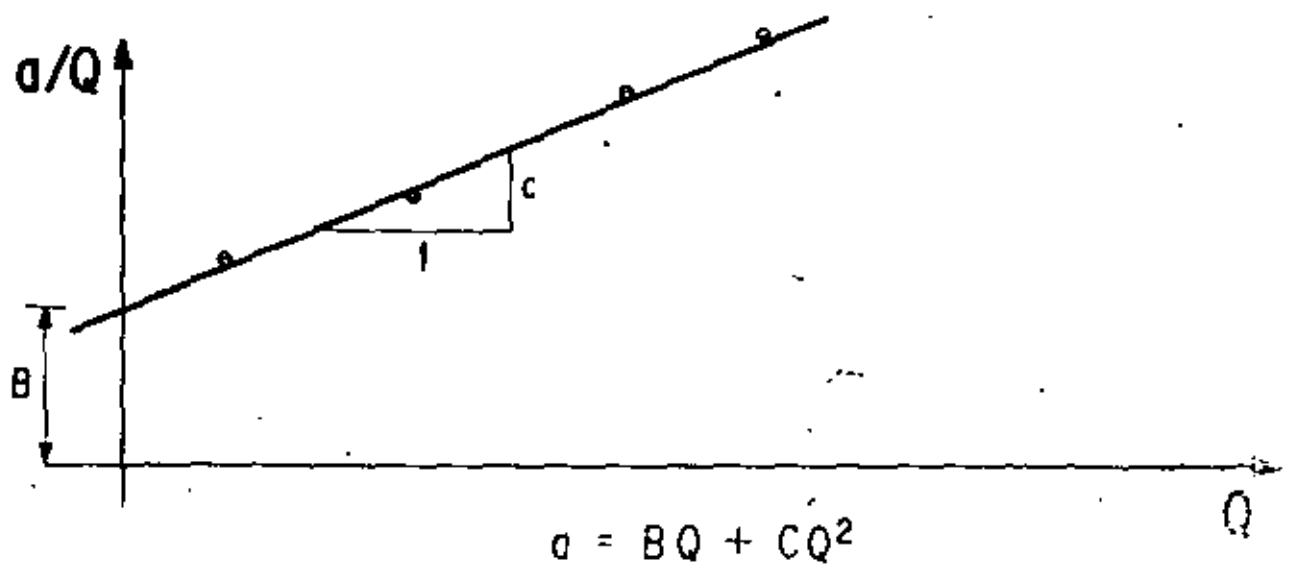
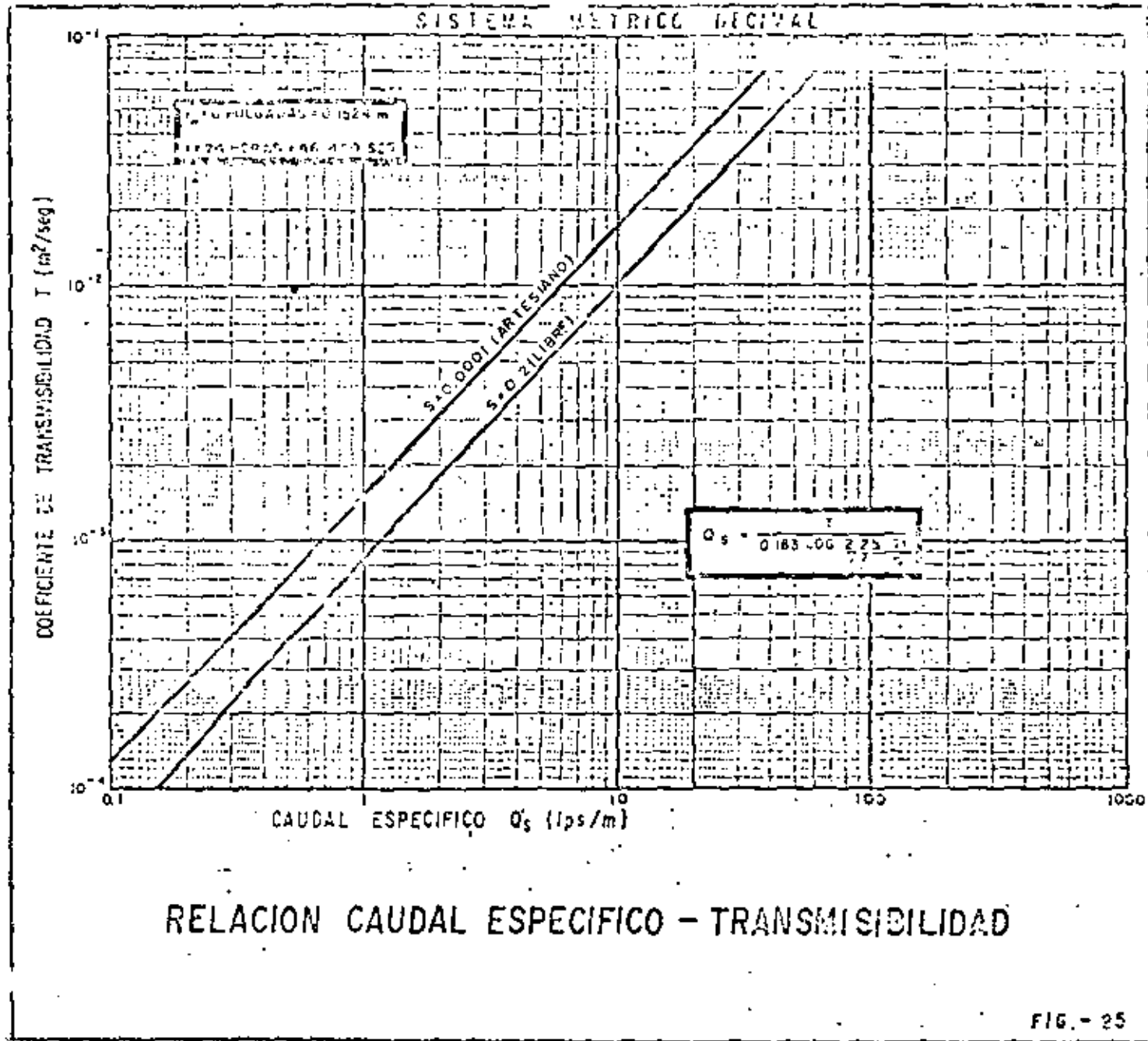
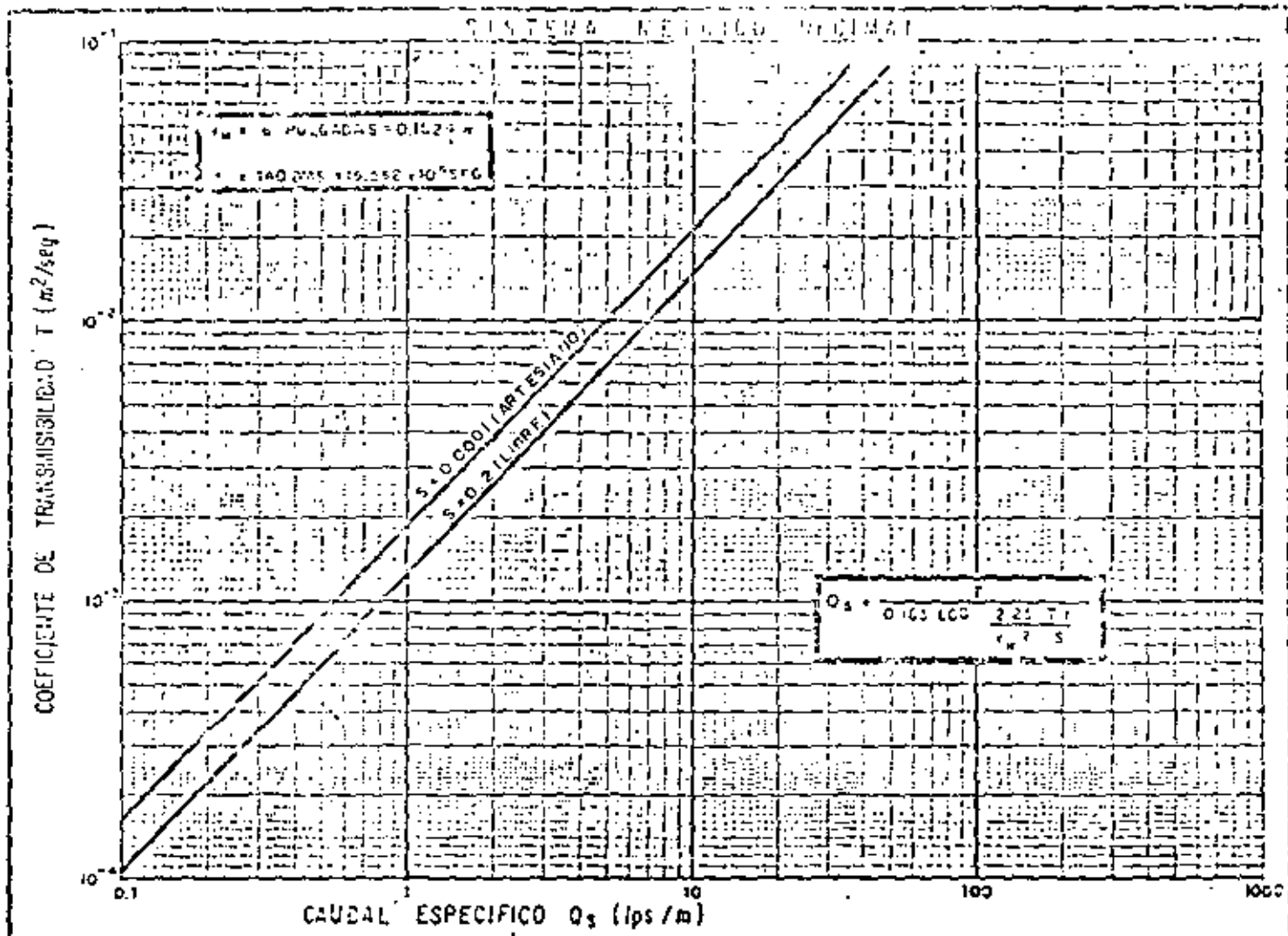


FIG. No 28



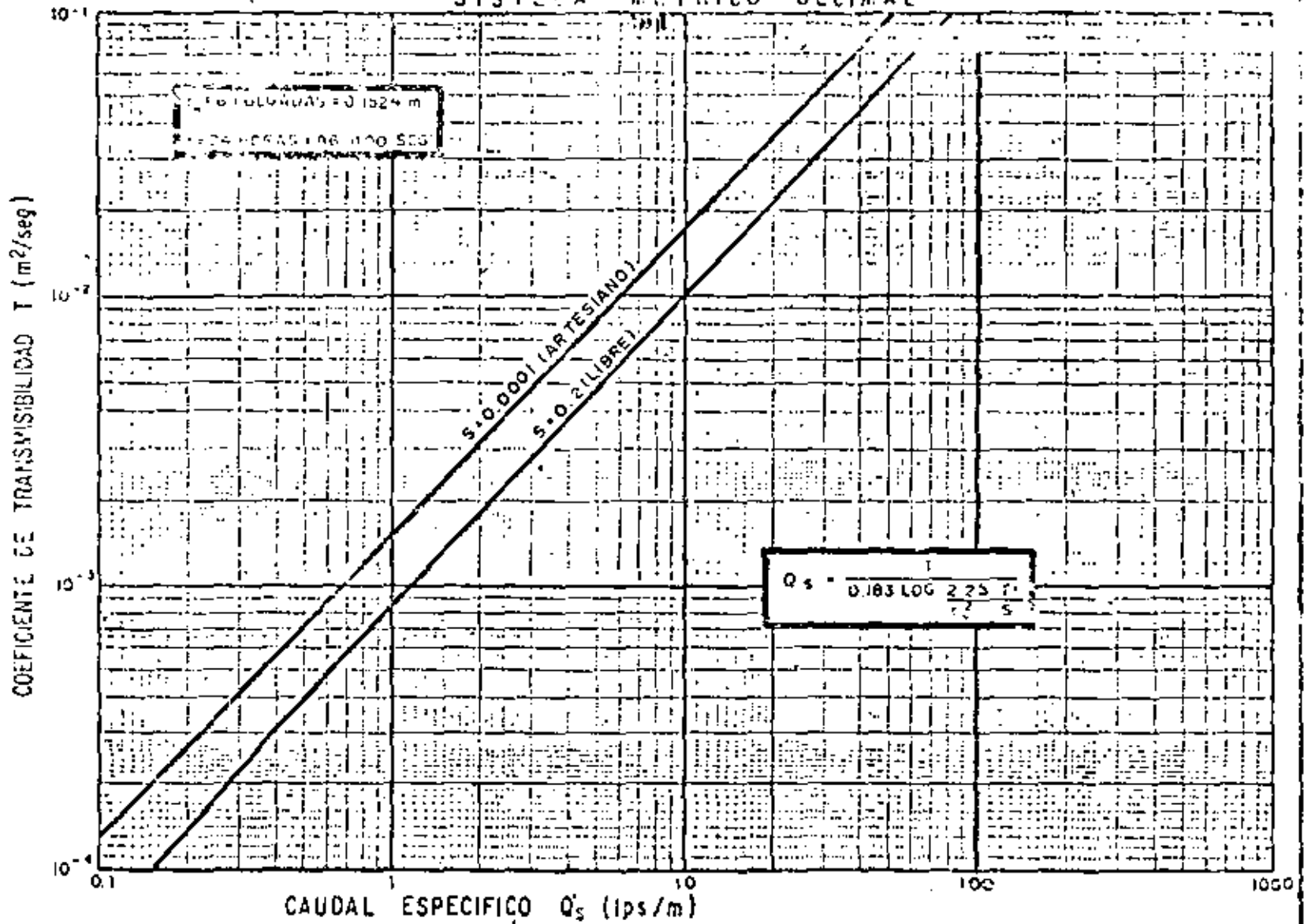






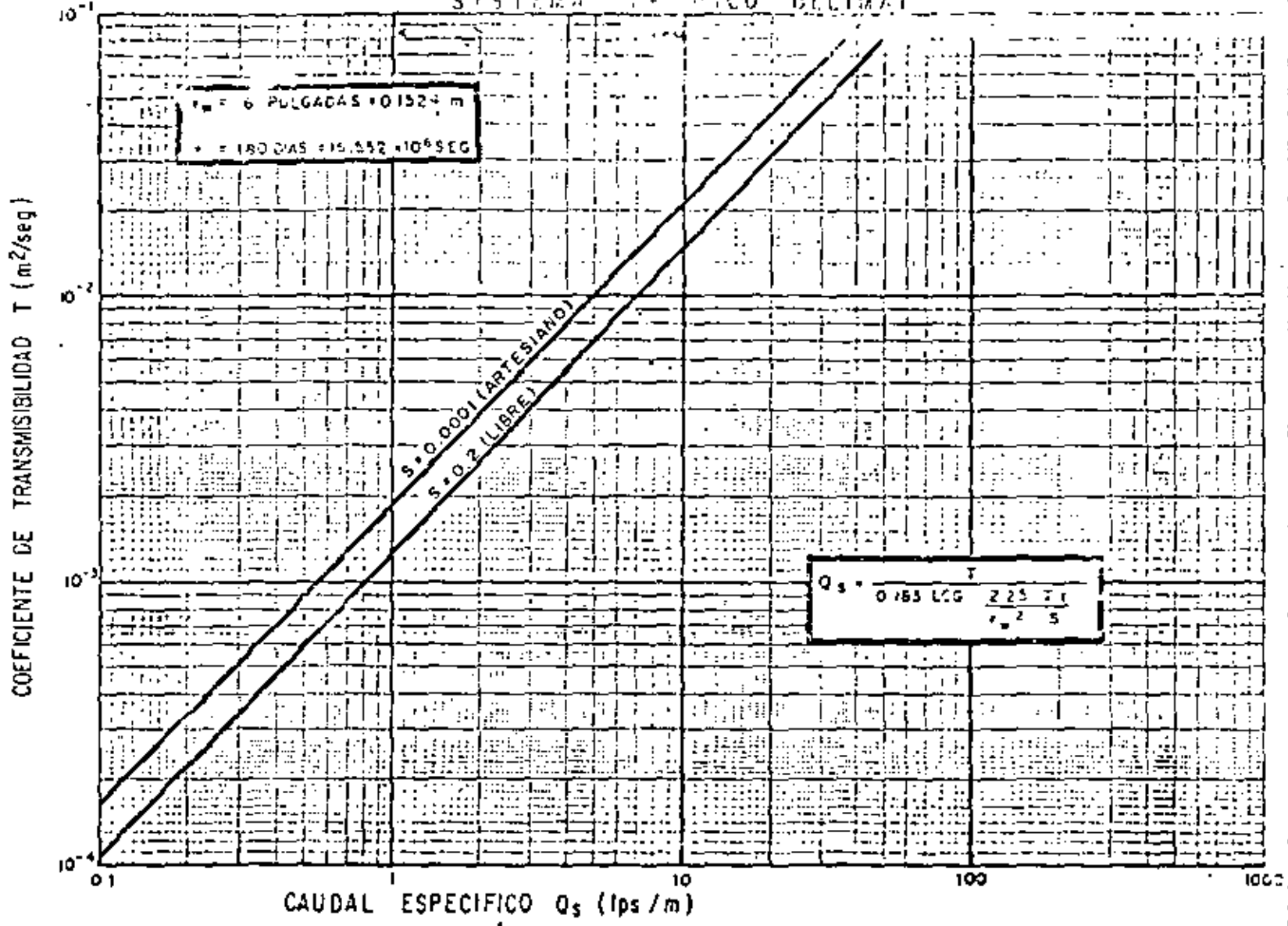
RELACION CAUDAL ESPECIFICO - TRANSMISIBILIDAD



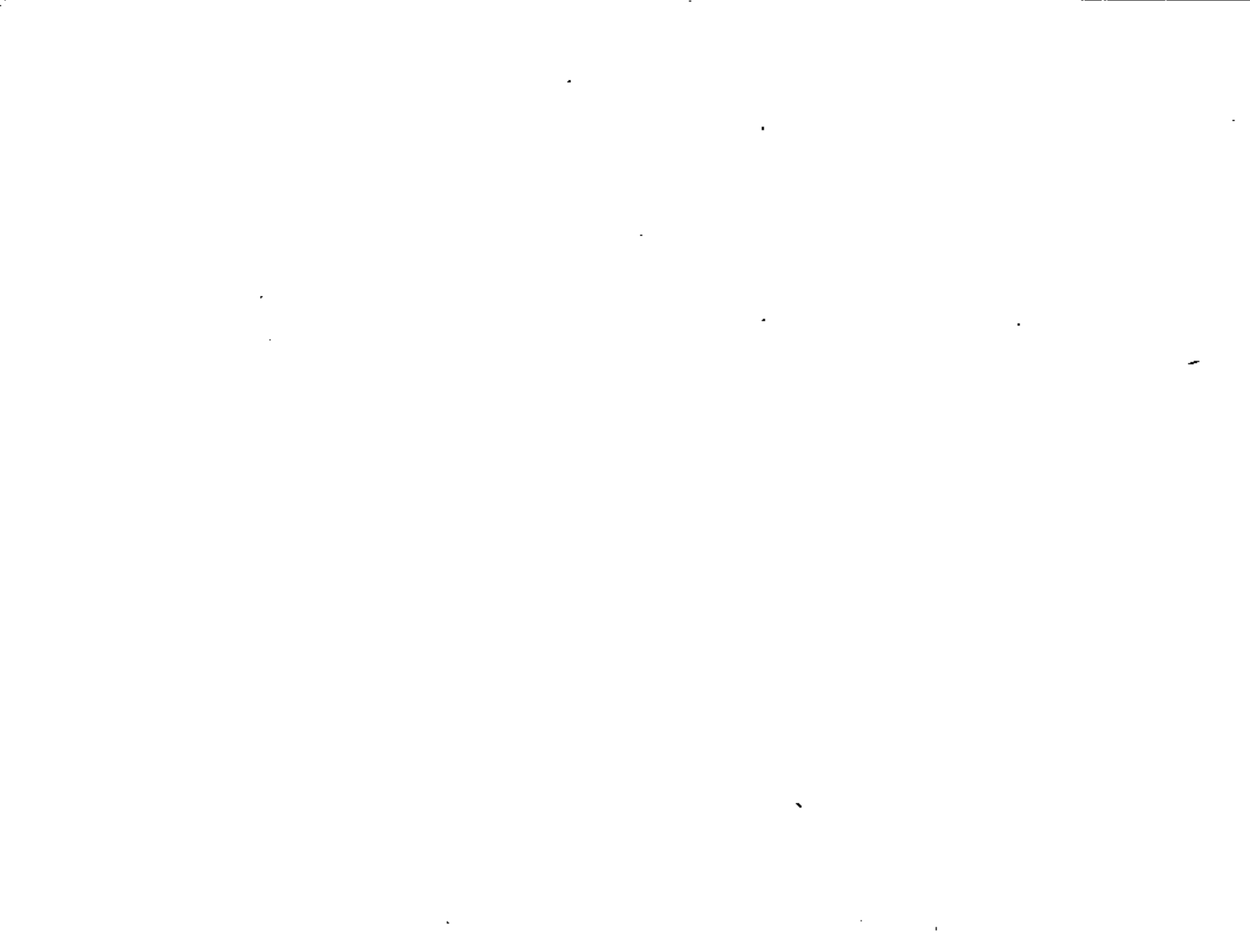


RELACION CAUDAL ESPECIFICO - TRANSMISIBILIDAD





RELACION CAUDAL ESPECIFICO - TRANSMISIBILIDAD



coeficientes buscados. Para ello, se elige un tiempo menor o igual que la duración de cada etapa, de preferencia tal que el nivel de agua ya se haya establecido; se mide gráficamente el abatimiento total correspondiente a este tiempo, tomado a partir del inicio de cada etapa; se calcula el coeficiente entre dichos abatimientos y los caudales respectivos, y con estos valores se traza la gráfica $a/Q - Q$, mostrada en la figura.

Si los puntos de esta gráfica muestran una tendencia lineal, se traza una recta de ajuste; el valor del coeficiente C está dado por la pendiente de esta recta, y el del coeficiente B es igual a la ordenada al origen.

Conociendo los valores de ambos coeficientes - es posible predecir la posición del nivel dinámico para cualquier caudal de extracción.

Es frecuente que los puntos de la gráfica se encuentren dispersos sin mostrar una tendencia definida; en ocasiones, esto se atribuye a una deficiente limpieza y desarrollo del pozo, aunque también puede deberse a una irregular distribución de las características hidráulicas de la formación.

